

Jorge Martins Teixeira

HABITABILIDADE NO SISTEMA SOLAR

Departamento de Física e Astronomia.
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
Ano de 2014

Prefácio

O tema da existência de vida no sistema solar é extremamente interessante. Gente de todas as idades, formações escolares e profissões se questiona se estamos sós no Universo. E gente de todos os tempos. É um assunto inesgotável.

Estar em cima deste planeta e ver aquelas pintinhas lá longe tão inacessíveis é sentir que estamos perante algo que nos ultrapassa completamente. Mas que é ao mesmo tempo extremamente fascinante. Isso mesmo tive oportunidade de constatar numa férias que passei no Alentejo quando estive presente no *Andanças* - basicamente uma série de pavilhões onde se aprende a dançar - pois quando me encontrava altas horas da noite a indicar aos meus colegas onde se encontrava a estrela polar, a posição da Via Láctea, e outros fenómenos astronómicos fui surpreendido por um grupo de umas dez pessoas, de todas as idades, que se apercebeu do que estava a fazer e propôs a realização de uma sessão de observação de astronomia naquele recinto. De pergunta a pergunta a olhar para o céu estrelado, os minutos passaram a mais de uma hora. Isto é, a juntar à dança propriamente dita não lhes parecia mal acrescentar as danças dos corpos celestes. Seria também interessante fazer uma pesquisa nos livros de divulgação científica quais aqueles que fazem da astronomia o seu principal tema. E dar o devido valor a estas matérias que têm sido um pouco subalternizadas no ensino por outras. E ir para o espaço é o nosso futuro.

Assim a Física e Química, as Ciências Naturais e a Biologia e Geologia têm no seu currículo partes de Astronomia. A Matemática pode ter magníficos exemplos para exercitar a construção e interpretação de gráficos. Pode-se considerar que a literatura tem um ramo específico relacionado com a astronomia que é a ficção científica. A imaginação de formas de vidas e visões de paisagens podem ser um forte motivo para criar lindos desenhos e quadros. É um tema ótimo para se fazer formação pois é interdisciplinar como prova a própria História Universal.

Jorge Martins Teixeira

Professor de Física e Química

Dedicada ao Francisco
aos meus pais
ao meu orientador e
aos meus professores de mestrado
aos meus colegas de escola
e a todos os que
dançam com estrelas

RESUMO

Esta tese está estruturada em cinco partes:

-Uma primeira parte em que se pretende caracterizar a vida sob o ponto de vista físico-químico. É dado um relevo especial às formas de vida extremófila que vivem no nosso planeta e aos ambientes que podem servir como modelos de ambientes fora da Terra. Referem-se também os sinais identificadores de vida

-A segunda parte trata da possibilidade de haver vida no Sistema Solar. Começa com os requisitos cósmicos necessários para um planeta ser habitável. Faz-se um relato da história do Universo depois da Terra no que à vida diz respeito. E depois faz-se uma viagem pelo sistema solar procurando os locais onde é mais provável haver ou ter havido vida com especial destaque para Marte, Titã, Enceladus e Europa.

-A terceira trata da vida além do Sistema Solar, caracterizando-se os métodos de deteção de exoplanetas e analisando alguns dos seus resultados. Também se discutem as zonas habitáveis estelares e galácticas.

-Na quarta referem-se as missões espaciais que já foram enviadas aos diferentes planetas do sistema solar. E o que se vai fazer no futuro próximo. Também se referem as limitações do Homem para poder viajar no espaço.

-A quinta trata destes assuntos sob uma perspectiva pedagógica. De facto estes assuntos podem ser utilizados para motivar o estudo de outras matérias numa perspetiva interdisciplinar. São apresentadas algumas atividade práticas muito simples de concretizar numa sala de aula e fora dela.

ABSTRACT

This thesis is structured in five parts:

-The first part aims to characterize life in a physical-chemical perspective. It is given a special focus about the extremophile forms of life that live in our planet and the environments that can serve as models of environments beyond Earth. Also refer to the identifying signs of life.

-A second part deals with the possibility of life in the Solar System. Begins with the cosmic requirements necessary for a planet to be habitable. It is an account of the history of the universe followed by the history of Earth in regards to life. And then it is a journey through the solar system looking for the places where it is more likely to be or have been living with special emphasis on Mars, Titan, Enceladus and Europa.

-A third deals with the life beyond the Solar System, featuring the methods of detecting exoplanets and analyzing some of its results. Also discuss the stellar and Galactic habitable zones.

-A fourth refers space missions that have been sent to different planets of the solar system. And what will be done in the near future. It also refers to the limitations of man to travel in space.

-A fifth addresses the issues from a pedagogical point of view. In fact these issues can be used to motivate the study of other materials from an interdisciplinary perspective. Some very simple practical activity to achieve inside or outside a classroom are presented.

RÉSUMÉ

Cette thèse est structurée en cinq parties:

-La première partie vise à caractériser la vie dans une perspective physico-chimique. Il est donné un accent particulier sur les formes de vie extrêmophiles qui vivent sur notre planète et les environnements qui peuvent servir de modèles de fonctionnement en dehors de la Terre. Se référer également aux signes d'identification de la vie.

-La deuxième partie traite de la possibilité de la vie dans le système solaire. Commence par les exigences cosmiques nécessaire pour une planète soit habitable. Il s'agit de raconter l'histoire de l'univers, suivie par l'histoire de la Terre en ce qui concerne la vie. Et puis c'est un voyage à travers le système solaire à la recherche des endroits où il est plus susceptible d'être ou avoir été la vie avec une attention particulière sur Mars, Titan, Encelade et Europe.

-La troisième traite de la vie au-delà du système solaire, caractérisant les méthodes de détection des exoplanètes et l'analyse de certains de ses résultats. Discutez également les zones habitables stellaires et galactiques.

-La quatrième traite des missions spatiales qui ont été envoyés à différentes planètes et autres corps du système solaire. Et ce qui sera fait dans un proche avenir. Il se réfère également aux limites humaines à voyager dans l'espace.

-La cinquième traite de ces sujets d'un point de vue pédagogique. En fait, ces sujets peuvent être utilisés pour motiver l'étude d'autres matières dans une perspective interdisciplinaire. Certaines activités pratiques très simple à réaliser dans une salle de classe ou l'extérieur sont présentés.

ÍNDICE

Prefácio.....	i
Dedicatória	ii
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Résumé.....	v
Introdução.....	1
1. Vida, essa desconhecida.....	3
1.1 O que é a vida?.....	3
1.1.1. Vida como transmissão de informação.....	4
1.1.2. Vida como desequilíbrio energético.....	5
1.1.3. Células.....	6
1.1.4. Os trabalhos moleculares da vida.....	8
1.1.5. Armazenamento da informação.....	11
1.1.6. Extração de energia.....	12
1.1.6.1. Respiração.....	12
1.1.6.2. Energia Inorgânica.....	13
1.1.6.3. Fotossíntese.....	15
1.1.7. Haverá outros caminhos?.....	16
1.1.7.1. DNA/RNA.....	17
1.1.7.2. Carbono.....	18
1.1.7.3. Água.....	19
1.2 Os extremófilos.....	22
1.2.1. As biosferas.....	22
1.2.1.1. Temperatura.....	22
1.2.1.2. Acidez.....	24
1.2.1.3. Salinidade.....	25
1.2.1.4. Extremófilos eucariontes.....	26
1.2.2. Ambientes propícios á vida.....	26
1.2.2.1. Vales secos da Antártida.....	26
1.2.2.2. Fontes hidrotermais.....	29
1.2.2.3. Aquíferos basálticos profundos.....	30
1.2.2.4. O lago Vostok e outros lugares	32
1.2.2.5. Vida nas nuvens	32

1.2.3. A Panspermia.....	33
1.2.4. As assinaturas da vida.....	38
2. A Vida no sistema solar	40
2.1 Requisitos cósmicos	40
2.1.1. Um mundo adequado	40
2.1.2. O ciclo carbonato-silicato e a tectónica de placa.....	41
2.1.3. Nem anã nem gigante.....	42
2.1.4. Efeitos de estufa e glaciares descontrolados.....	44
2.1.5. A Lua	45
2.1.6. O protector Júpiter	45
2.1.7. Assassinos do espaço sideral.....	46
2.2. A construção de uma Terra habitável.....	48
2.2.1.O Sistema Solar	48
2.2.2. A criação dos elementos.....	49
2.2.3. O nascimento de um sistema planetário.....	52
2.2.4. Big Splash - um impacto que priginou a Lua.....	56
2.2.5. Formação de um planeta com camadas.....	57
2.2.6. Bombardeamento passado tardio	58
2.2.7. Acabamentos finais.....	60
2.2.8. O aparecimento de vida.....	62
2.2.9. Os primeiros fósseis.....	66
2.2.10.A fotossíntese e a revolução do oxigénio.....	67
2.2.11.Os eucariontes e os organismos multicelulares.....	68
2.2.12. A explosão Câmbrica e a “Terra bola de neve”.....	69
2.3. Por toda a parte no Sistema Solar.....	72
2.3.1. Mercúrio e Lua.....	73
2.3.2. Vénus, o planeta vulcânico.....	74
2.3.3. Marte, o planeta vermelho.....	77
2.3.4. Os asteroides.....	88
2.3.5. As luas de Júpiter	90
2.3.5.1. Europa.....	92
2.3.5.2. O gigante Ganimedes e o imprevisível Calisto.....	94
2.3.6 Saturno, a jóia do Sistema Solar.....	95
2.3.6.1 Titã, uma fábrica de produtos químicos.....	95

2.3.6.2 Enceladus, uma pequena lua muito ativa.....	99
2.3.7 Tritão em contramão.....	101
2.3.8. Cometas, essas bolas de gelo sujas.....	103
2.3.9. O sistema Plutão-Caronte e outros TNO's.....	107
3. A Vida fora do Sistema Solar.....	108
3.1 Zonas habitáveis no Universo.....	108
3.1.1.Zonas habitáveis estelares.....	108
3.1.2. Zona habitável da Galáxia.....	112
3.1.3. Zonas habitáveis e tempo.....	115
3.1.4. As estrelas.....	115
3.2 A caça dos exoplanetas.....	118
3.3 Resultados.....	123
3.3.1. Júpiteres quentes	124
3.3.2. Levantando o véu da noite.....	127
3.3.3. Casos interessantes.....	129
4 Missões espaciais.....	133
4.1 História da exploração do Sistema Solar.....	133
4.1.1 As observações efetuadas a partir da Terra.....	133
4.1.2 A exploração de Marte.....	134
4.1.3 Exploração dos outros objetos telúricos	135
4.1.4 O Sistema Solar exterior.....	138
4.1.5 Outros objetos estelares.....	138
4.1.6 Os pequenos corpos.....	139
4.2. Os desafios do século XXI.....	140
4.2.1 Exploração de Marte.....	140
4.2.2 Exploração de Europa e Titã.....	141
4.2.3 Planetas extra-solares.....	142
4.2.4 Outros projetos de exploração espacial.....	142
5 O Sistema Solar vai à Escola.....	145
6 Conclusão.....	164
7 Referências bibliográficas.....	166

LISTA DAS FIGURAS

Fig.1 - Tipos de células. Fonte: uma imagem retirada de um blogue da net.

Fig. 2 -A árvore da vida Fonte: *Life in the Universe* de Thérèse Encrenaz and Athena Coustenis (Imagem de Brooks et al., 2003) pp 26

Fig. 3 - A Quiralidade dos aminoácidos. Fonte: Lewis Dartnell, “*Life in the Universe*”, pp 10

Fig. 4 - A escada dos pares redox. Fonte: Lewis Dartnell, *Life in the Universe*, pp 15

Fig. 5 - Diagrama de fases da água. Fonte: Lewis Dartnell, *Life in the Universe*, pp 61

Fig. 6 - O ciclo carbonato-silicato. Fonte: *Rare Earth*, Peter D. Ward and Donald Brownlee, 2003 - pp 211

Fig. 7 - As proporções relativas em número dos elementos mais abundantes no Sol. Fonte: *Rare Earth*, Peter D. Ward and Donald Brownlee, 2003 - pp 41

Fig. 8 - Estimativa do crescimento da massa continental com o tempo (adaptado de Taylor, 1992). Fonte: *Rare Earth*, Peter D. Ward and Donald Brownlee, 2003 - pp 202

Fig. 9 - Mapa de Marte. Fonte: retirado da net

Fig. 10 - Estrutura interna de Ceres com um oceano líquido. Fonte: retirado da net

Fig. 11 - Diagrama de fases do metano comparado com o da água. Fonte: Introduction to Planetary Science, Gunter Faure e Teresa M. Mensing, Springer 2007

Fig. 12 - A química complexa da atmosfera de Titã e a sua estrutura em camadas. Fonte: Imagem cedida por cortesia da NASA/JPL/H.Waite e retirada da obra, “*Life beyond Earth*” de Thérèse Encrenaz & Athena Coustenis, pp 150

Fig. 13 - Os quatro tipos de habitats que podem existir no Universo: Fonte: *Life in the Universe* de Thérèse Encrenaz and Athena Coustenis (Adaptado de Lammer et al., 2009) pp 67

Fig. 14 - Condições da Zona habitável da Galáxia. Retirado da net.

Figura 15 - Diferença entre eclipse, trânsito e ocultação. Da minha autoria

Fig. 16 Os quatro métodos indiretos para descobrir exoplanetas. Fonte: Lewis Dartnell, *Life in the Universe*, pp 154

Fig. 17 - Este diagrama compara o nosso sistema solar com o sistema estelar, Kepler-22, contendo um planeta, Kepler-22b situado na sua zona habitável. Fonte: SPACE.COM, NASA telescopes confirms alien planet in habitable zone, 11 Dezembro 2011

Fig.18 - Mundo Goldilocks: talhados para a vida. Retirado da revista, National Geographic Magazine, Julho 2014 (Fonte: Abel Mendez, Laboratório de Habitabilidade Planetária, Universidade de Porto Rico em Arecibo)

ANEXOS:

- 1 - História dos planetas terrestres
- 2 - História geobiológica da vida na Terra
- 3 - O Bombardeamento Pesado Tardio
- 4 - Um planeta vagabundo (ou escuro)

Introdução

O objetivo principal da dissertação é a *identificação* e **caracterização** dos locais no **Sistema Solar** com o maior **potencial** para a presença da **vida**.

Assim, é necessário em primeiro lugar definir cientificamente o que é a vida e para isso é necessária uma descrição com base em leis físicas e químicas. E sendo a vida um fenómeno muito complexo, uma descrição das principais formas de vida impõe-se naturalmente. É o que se faz no primeiro capítulo.

Por outro lado, a descoberta das formas extremófilas aqui na nossa Terra implicou uma multiplicação extraordinária no espaço e no tempo de ambientes propícios à vida. Então torna-se necessário descrever essas formas de vida, essas condições e as relações entre elas nos ambientes terrestres mas extremos. E a haver estes ambientes no espaço pode mesmo acontecer que a vida não se tenha originado cá mas sim que veio do espaço. Tudo isto é discutido. E por aqui termina o primeiro capítulo: “Vida essa desconhecida”.

No segundo capítulo entra-se no Sistema Solar, ou seja, nos seus locais com maior potencial. E começa-se logo pelo local onde a vida existe: a Terra. Ora, para esta ter vida teve de satisfazer determinados requisitos de ordem cósmica. É o assunto da primeira parte do segundo capítulo.

E a Terra existe há muito tempo. E nasceu juntamente com os outros planetas à volta do Sol. Para melhor compreender que aqui haja vida é necessário saber tudo o que se passou desde a origem do Universo. É deste assunto que se trata a seguir na segunda parte do segundo capítulo: por ordem, o nascimento do Universo com o hidrogénio e o hélio, formação dos metais, formação dos planetas terrestres. Depois, formação do sistema solar, aparecimento de vida e sua evolução até aos nossos dias.

A partir do Sistema Solar já formado uma “viagem” é feita para identificar e caracterizar os planetas e luas com mais potencial para ter a vida. Na parte final deste capítulo procura-se compreender a razão por que não há vida superficial pelo menos em Marte e Vénus. O que se passou no passado nestes planetas é discutido.

Mas o sistema solar faz parte da galáxia. E nesta há muitas estrelas. Mais importante ainda, uma verdadeira chuva de exoplanetas estão a ser descobertos e cada vez mais á medida que o tempo passa. Neste terceiro capítulo aborda-se as zonas de habitabilidade estelares, fazendo feedback sempre que necessário ao sistema solar.

Depois aborda-se a zona habitável da galáxia. Finalmente, referem-se os métodos para detetar exoplanetas e analisam-se alguns dos resultados da sua aplicação.

Para a *identificação dos locais* também há que ir lá ver. Com tecnologia com ou sem robots. Agora e sempre. Um capítulo é dedicado às missões espaciais. Passadas e futuras. Mas o ideal é mesmo ir lá. Ora o corpo humano está habituado á aceleração de gravidade da Terra. Breves referências são feitas quanto a possíveis viagens tripuladas no espaço e problemas que podem surgir.

Mas este assunto é suficientemente encantador para ser utilizado como motivação para dar até outras matérias que parecem ter pouco a ver com astronomia no ensino básico e secundário. Assim um capítulo é dedicado aos programas escolares que contemplam estas matérias e á discussão de formas de dar outras iniciando-as com factos e situações envolvendo corpos celestes. Uma série de atividades práticas são sugeridas para concretizar tudo isto.

1. VIDA, ESSA DESCONHECIDA

1. 1 O QUE É A VIDA?

Esta questão que parece fácil de responder tem atormentado biólogos, filósofos e teólogos desde tempos imemoriais.

É extremamente fácil distinguir entre o que está vivo e o que está morto. Os carvalhos, leões e cogumelos estão obviamente vivos. Se dermos um pontapé num cão ele *reage* e, por vezes, levamos uma dentada por, pelo menos aparentemente, só interferir na integridade física desse sistema extremamente complexo! O mesmo ato sobre uma pedra e não há reação. Esta apenas se move de determinada maneira mas depois ... repousa. Podemos é ficar com o pé a doer graças à terceira lei de Newton - lei da ação e ... *reação*. Também se reconhece que algumas formas de vida existem em diferentes escalas de tempo ou de dimensões. Se observarmos líquenes, durante períodos suficientes de tempo, nas crustas coloridas agarradas a velhas paredes de pedra, podemos vê-los a crescer e a desenvolver-se; um teste químico do ar à sua volta chega para provar que são organismos fotossintetizadores. Observando ao microscópio uma gota de água de uma lagoa vêem-se muitos organismos minúsculos a mover-se. Por outro lado, rochas, chamas e nuvens são claramente não vivos.

Mas que características ou propriedades têm os seres vivos que os permitam distinguir das coisas não vivas?

Convém desde já realçar que, de facto, os elementos são exatamente os mesmos. O ato de ingerir alimentos e energia e crescer apenas é o resultado de trocas de matéria mineral e energia entre um organismo vivo e o exterior.

As crianças na escola são ensinadas que a vida pode ser definida por uma lista de verificação com sete características: que as coisas vivas *alimentam-se, excretam, movem-se, crescem, reproduzem-se, respondem a mudanças no seu meio ambiente e mantêm um estado interno constante*. Algumas entidades não vivas satisfazem algumas destas características: as chamas dos candeeiros e os incêndios crescem e espalham-se, autossustentando-se a partir de um fluxo de energia, consumindo combustível e excretando resíduos pelas mesmas reações de combustão que ocorrem numa célula e o modelo padrão perfeitamente ordenado dos átomos de um cristal é

capaz de se reproduzir a ele próprio. Igualmente, algumas coisas vivas não se ajustam a todas as características: as mulas e as formigas operárias são estéreis e não se reproduzem; contudo cada uma das suas células está viva apesar do animal como um todo falhar o hepta teste (Dartnell, 2007, p.1-7).

No entanto, há mais definições de vida, para além da anterior. E se calhar tantas quantos os ramos do saber, de acordo com as vivências, profissões, sensibilidades e interesses de cada um. Umas, reduzindo a vida mais a uns aspetos do que outros. Umas mais amplas do que outras. Por exemplo, muitos caracterizavam a vida não de acordo com aquilo de que ela era feita (até final do século XIX ninguém fazia a menor ideia) mas de acordo com aquilo que ela fazia.

Fazer uma lista razoável das funções dum organismo tem de incluir algo que pode ser executado também por coisas que não estão vivas, apesar de algumas coisas não vivas executarem funções que alguns organismos vivos não podem executar. E a definição de vida deve ser o mais refinada possível pois, de facto, é importante para se traçarem estratégias para a sua procura. E ser o mais abrangente possível para incluir todas as formas de vida possíveis e não só aquelas a que o Homem está habituado.

1.1.1. Vida como transmissão de informação

Uma tentativa de caracterizar a vida é conhecida como a **definição Darwiniana**.

Primeiro, a vida deverá conter uma descrição de si própria; um manual de operações ou conjunto de instruções acerca do modo como pode ser reconstruída. Ora, os cristais podem ser deste modo excluídos, pois não têm uma verdadeira descrição deles próprios mas crescem porque a sua estrutura organiza unidades livres num padrão já existente.

Segundo, o individuo deverá ser capaz de transportar as instruções dentro de si próprio e consequentemente autorreproduzir-se. Isto exclui desde logo os vírus pois reproduzem-se por sequestro, ou seja, assaltam a maquinaria celular da célula refém que infetaram e usam-na para se reproduzir. Portanto, sem essa maquinaria não se reproduzem. Toda a vida na Terra tem o seu manual de operações, o seu texto que nada mais é que um conjunto de genes existentes na molécula do DNA. Um enorme exército de proteínas traduz e operacionaliza as instruções. Este tipo de classificação também é conhecido como **informação genética**.

Terceiro, estabelece que o sistema deve ser capaz de evolução por seleção natural. Isto implica que o método de duplicação da informação genética deverá ser impreciso, introduzindo erros ou mutações, criando variações aleatórias entre uma população de cópias, assegurando que perante uma situação de stress ambiental, só algumas sobrevivem para se reproduzir. É o mecanismo da evolução Darwiniana: ao longo do

tempo as cópias adaptam-se para se tornarem mais bem-sucedidas nas suas vizinhanças.

Ora, esta definição Darwiniana prescreve que a vida deverá possuir apenas um sistema de armazenamento e transferência de informação transmitindo as instruções genéticas para a próxima geração. Assim a vida é definida **pelo que faz** e não por **aquilo de que é feita**.

Esta classificação é menos restritiva que outras e inclui a '**a vida não biológica**'. O desenvolvimento da vida artificial ou vida-A é um campo em expansão. Muitos sistemas diferentes foram construídos, por exemplo, com um código duplicador de computador a substituir os polímeros orgânicos e um disco duro como um "caldo primordial". O processo de mutação, competição, morte e evolução são os mesmos, apenas o meio de suporte é que é diferente.

1.1.2. Vida como desequilíbrio energético

Uma segunda definição de vida específica que, em adição à transmissão de informação, o sistema deverá extrair energia para se manter a ele próprio.

Ora um sistema que se auto-reproduz necessita de um extraordinário nível de complexidade. E organizações complexas são muito improváveis - há muitas mais maneiras desordenadas de arranjar uma nuvem de átomos do que ordená-los numa célula que funcione. Além disso, tudo no Universo naturalmente se deteriora de um estado de maior ordem para outro de maior desordem.

Então qual é a lei inexorável que faz com que todas as estruturas organizadas sejam ameaçadas pela desorganização e a desordem?

Quanto maior for o grau de ordem ou de organização de um sistema (como a célula) maior será a quantidade de energia necessária para manter a sua organização contra a tendência natural para a desordem. Esta energia tem de penetrar continuamente no sistema senão, ele não tardará a desagregar-se.

A degradação de energia útil sempre que se dá um processo natural é ditada pela **segunda lei da termodinâmica**.

À medida que cresce este nivelamento irreversível, cresce o valor de uma grandeza física abstrata designada por, **entropia**. Esta mede o grau de "degenerescência" ou de "usura" da energia, ou o grau de desordem numa estrutura organizada. Há também a conceção mais atual de entropia como falta de "quantidade de informação". Quanto maior a entropia menor informação se pode tirar a um sistema.

Para lutar contra os efeitos da entropia e evitar este nivelamento energético que é a morte, a célula tem então uma constante necessidade de energia "fresca". Esta

energia é constantemente recebida do exterior sob a forma de alimentos. Por isso, todos os seres vivos, mesmo os mais simples são obrigados a alimentar-se. A energia pode ser extraída de algo à medida que se degenera: por exemplo o calor libertado de um cepo de madeira, altamente organizado através duma rápida série de reações de oxidação reduz-o a cinzas e gases. Efetivamente, a vida permite a um sistema descer a “declive” da organização para puxar outro para cima. Um fungo a germinar num tronco de uma árvore sobrevive extraindo a mesma energia que um incêndio mas de um modo cuidadosamente controlado.

A vida terrestre moderna executa estas funções de um modo elegante. Contém uma descrição completa de si própria assim como uma elaborada rede de reações químicas que libertam energia, aproveitando-a para construir moléculas úteis e manter a sua própria complexidade. Um “exército” de proteínas supervisiona esta rede metabólica e fornece a maquinaria necessária para cumprir as instruções contidas no DNA e copiá-las para a próxima geração. Um terceiro atributo da vida terrestre é de que está contida num espaço fechado. Toda a vida na Terra tem células e estas são limitadas por membranas que fisicamente separam o interior do exterior. Estas evitam que os diferentes componentes se afastem uns dos outros, permitindo o controlo sobre toda a situação interna, a importação e acumulação de nutrientes valiosos, a exclusão de resíduos e a criação de gradientes químicos para permitir a produção de energia.

1.1.3. Células

Inicialmente pensava-se que havia apenas dois tipos de células - procarióticas e eucarióticas - logo, dois tipos fundamentais de vida no nosso planeta. As eucarióticas possuem núcleos, tal como as nossas, as dos animais, plantas e fungos onde guardam o seu DNA. As procarióticas não têm núcleo, tais como as das bactérias supondo-se que são mais antigas. De facto, os vestígios mais antigos de seres eucariontes são de há 1,5 Ganos atrás enquanto os dos procariontes datam de, pelo menos, 3,8 Ganos. Mas há quem discorde (Benton, M. J., 2008, p. 51).

Procarióticas significa literalmente “antes do núcleo”. O DNA destas últimas flutua livremente dentro do citoplasma da célula. O DNA dos eucariontes é estabilizado em cromossomas, dentro do núcleo e esta inovação parece ter permitido uma muito maior capacidade de informação - o genoma dos eucariontes é cerca de 10 mil vezes maior que o das bactérias. Não admira pois que, para conter toda a sua organização interna, as células eucarióticas também sejam maiores (cerca de mil a 10 mil vezes mais volumosas) e mais complexas. E são as que constroem os seres multicelulares.

Mas há mais diferenças. Uma célula de um eucarionte possui muitos compartimentos ou “organelos”, tais como as mitocôndrias e os cloroplastos (estes só nas plantas e

nas algas), cada um com uma função específica. As mitocôndrias são as centrais de potência de uma célula pois executam muitas das reações que extraem energia dos compostos presentes nos alimentos para produzir a molécula armazenadora de energia, adenosina trifosfato (ATP). Os cloroplastos executam as reações de absorção da luz, ou seja, as reações da fotossíntese. O processo de síntese de proteínas também é muito mais sofisticado nos eucariontes. Nas plantas as paredes das células são mais espessas para proteção e suporte.

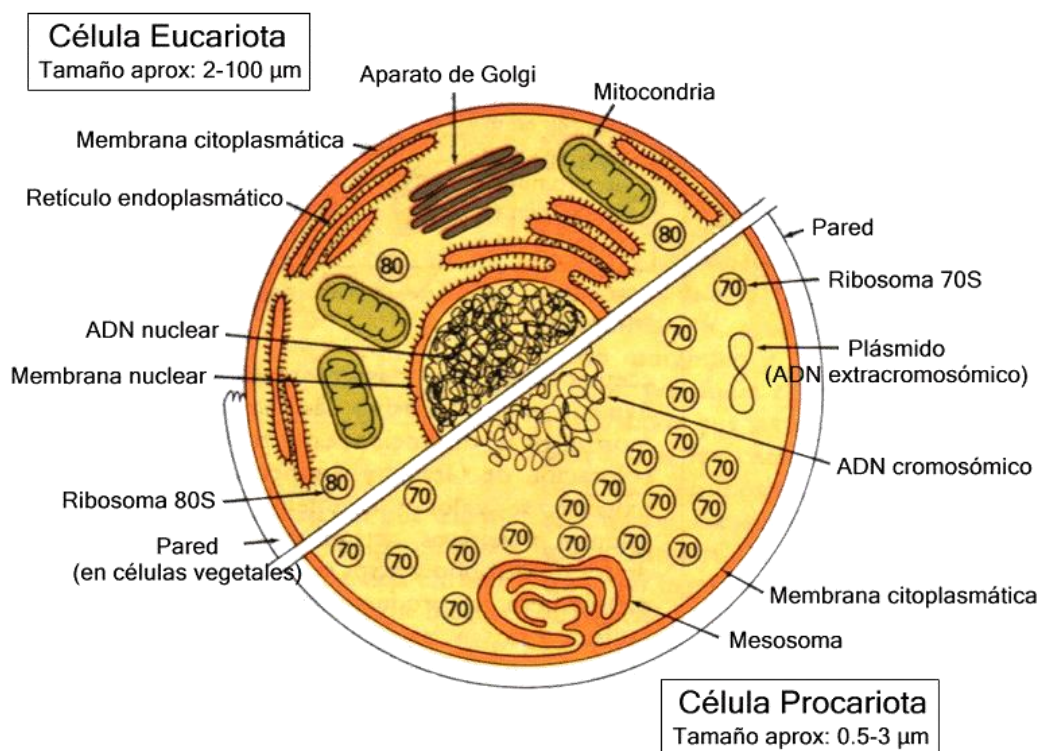


Fig. 1 Tipos de células: eucariótica e procariótica. Fonte: uma imagem retirada de um blogue da net

No entanto o número de células procarióticas é muito maior do que o das eucarióticas. A viver sobre e dentro do nosso organismo o número total de células procarióticas ultrapassa pelo menos, dez vezes o número total de células eucarióticas: logo somos muito mais bactérias que humanos.

Nos anos oitenta do século XX, a aplicação duma nova técnica baseada na sequência de genes particulares alterou esta visão tradicional de duas formas de vida. Com base nela introduziram-se novidades na árvore da vida: os **procariontes** dividiram-se em dois domínios: **bactéria** e **archaea**. De facto há uma diferença genética tão grande entre as células humanas e o germe que nos cria uma dor de estômago como a existente entre este último e um archaea que vive numa fonte termal.

Há um consenso entre todos os biólogos de que toda a vida na Terra descende de um antepassado comum, um organismo designado por LUCA. Mas a verdadeira árvore da

vida é certamente muito mais complexa que aquela que nos tem sido apresentada. Houve trocas de genes entre células diferentes, muito mais frequentes na Terra primitiva, tornando bem mais complexa a compreensão da sua relação. Estudos extensivos de genes mostram que os eucariotas contêm muito mais material de bactéria do que archaea. Os eucariotas formam a ponte entre os outros dois domínios, e a árvore da vida transforma-se mais num anel de vida.

1.1.4. Os trabalhos moleculares da vida

Passemos agora da dimensão da célula para a dimensão atômica e molecular. É entre estas duas dimensões que se encontra, provavelmente, a fronteira entre o que é vivo e o que não é vivo. O

corpo humano contém mais ou menos tantas células como uma célula contém de átomos. Um átomo não está vivo mas uma célula sim. Que se passa entre a célula e o átomo que faz surgir a vida? De que modo é a matéria animada para produzir vida? Que moléculas são responsáveis por estas habilidades espantosas?

Basicamente uma

célula tem três componentes: membrana exterior, sistema genético e metabolismo.

Uma membrana celular é formada a partir de uma camada de moléculas que têm as extremidades que se dissolvem bem na água todas do mesmo lado e as longas caudas gordas que não se dissolvem no outro lado. Ora, conjuntos destas moléculas dispõem-se naturalmente de modo a ficar com as suas caudas gordas fora de água, formando uma dupla camada com as caudas alinhadas de ponta a ponta no meio.

O metabolismo é o nome geral dado à complexa e espantosa rede de reações que convertem as substâncias químicas umas nas outras dentro da célula. Pensa-se que muitas das pequenas moléculas orgânicas (os químicos chamam orgânicas às

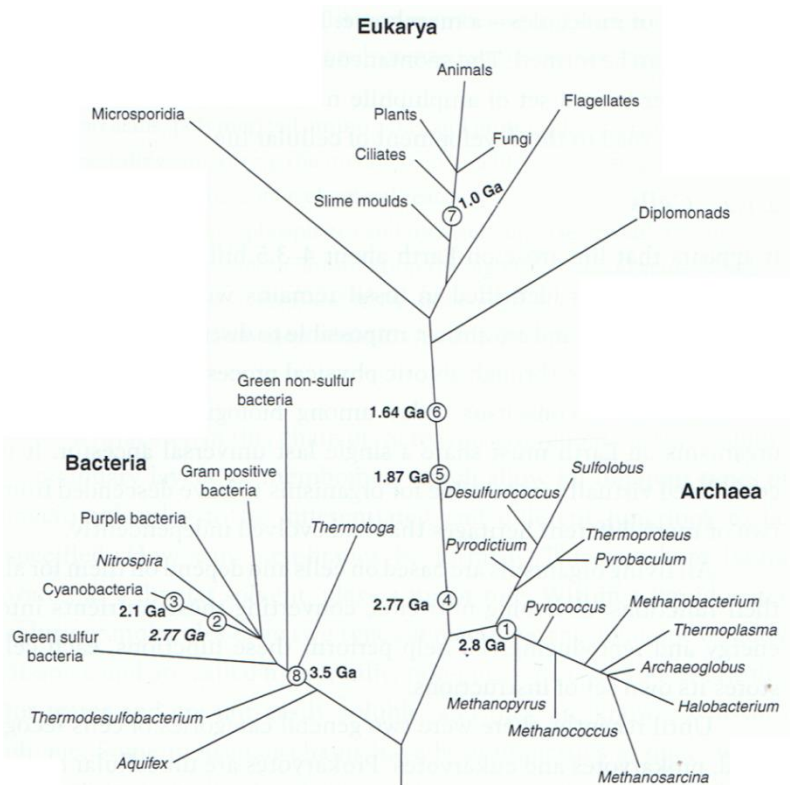


Fig. 2 - A árvore da vida. Fonte: Life in the Universe de Thérèse Encrenaz and Athena Coustenis (Imagem de Brooks et al., 2003) p. 26

moléculas que contêm carbono) existiram naturalmente em processos abióticos na Terra primitiva e acabaram por ser incorporadas no metabolismo à medida que este se desenvolveu e expandiu. Ao longo do tempo a vida começou a inventar novas e maiores moléculas para executar as suas funções. Por exemplo, longas cadeias de subunidades de açúcar, tais como o amido, são uma maneira compacta de armazenar energia e carbono. Outros polímeros de açúcar fornecem suporte rígido. Quitina é usada para construir os rígidos esqueletos exteriores dos artrópodes (tais como os insetos e caranguejos) e as bactérias são protegidas por uma parede de polímeros de aminoácidos. Camisas de algodão, estantes de madeira, e as páginas deste livro são principalmente fibras de celulose, um polímero construído com unidades de glucose. Contudo, pela grande diversidade de estruturas e funções desempenhadas dentro da célula os polímeros finais são as proteínas.

Assim como uma casa é feita de tijolos e cimento, pode dizer-se que a célula é em grande parte feita de moléculas gigantes: as **proteínas**. São usadas para tudo desde suporte estrutural, transporte de produtos químicos valiosos, envio de sinais e como **enzimas** acelerando as reações metabólicas. Por mais diferentes que possam ser, todas as proteínas são constituídas pelas mesmas subunidades - os *aminoácidos* - uma classe de pequenas moléculas tendo numa extremidade um grupo *amina* (que é alcalino), na outra extremidade um grupo *ácido* e um grupo lateral que dá a cada aminoácido ligeira diferença nas suas propriedades. Ora estas subunidades encontram-se ligadas umas às outras como as carruagens de um comboio. E como nestes há carruagens com funções diferentes (de mercadorias, de passageiros, de correio, etc) mas o seu sistema de engate é sempre obrigatoriamente idêntico também os aminoácidos podem ter uma forma e uma função diferentes mas o “sistema de engate químico” é idêntico para todos eles: um grupo amina de um aminoácido vai reagir com um grupo ácido do outro aminoácido, formando uma ligação química, depois de eliminada uma molécula de água.

Existem nos seres vivos cerca de vinte diferentes tipos de aminoácidos. E com estes podem-se construir um número prodigioso de “comboios-proteínas”, do mesmo modo que se pode escrever um número incalculável de frases com apenas vinte e três letras do nosso alfabeto. É a *ordem* pela qual se dispõem os aminoácidos que confere a cada proteína as suas características próprias.

Alguns grupos laterais dissolvem-se bem na água enquanto outros não. Para uma proteína ser solúvel a sua longa cadeia deve assumir uma complicada configuração tridimensional em espiral mantida junta por ligações entre os seus grupos laterais que protegem os aminoácidos insolúveis no seu interior. A configuração final é

extremamente precisa; as proteínas são capazes de reconhecer e ligar-se a outras proteínas, DNA, RNA ou reagentes metabólicos com requintada especificidade.

As enzimas são proteínas especiais, uma espécie de ferramentas feitas por encomenda para catalisar reações permitindo que os processos ocorram mais depressa. Cada enzima só pode executar uma pequena mudança num composto: ligar um grupo fosfato, remover um grupo hidroxilo ou quebrar uma ligação para partir uma cadeia carbonada em duas. Percursos metabólicos completos contêm enormes quantidades de diferentes enzimas que permitem a uma molécula transformar-se de um modo gradual noutra.

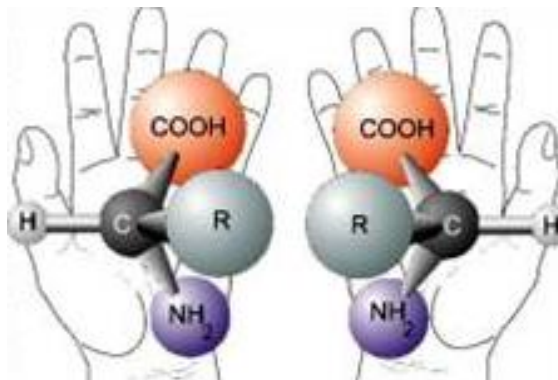


Fig 1 - A quiralidade dos aminoácidos. Apenas a versão da mão esquerda é que é usada pela vida. 'R' representa o grupo lateral, em que 20 diferentes tipos são usados.

Fonte: "Life in the Universe" Lewis Dartnell

A estabilidade das enzimas depende da temperatura. Quando se aquecem as enzimas os cordões de aminoácidos vibram; a altas temperaturas vibram tanto que as ligações entre os grupos laterais são quebradas e a proteína perde a sua configuração vital. Se a água penetrar dentro da enzima, toda a sua estrutura é destruída e "salta" para fora da solução. É a *desnaturação* - visível quando se frita um ovo, pois a proteína *albumina* solidifica-se e torna-se branca. Se alterarmos a carga elétrica à volta da proteína, tal como acontece numa extrema salinidade ou acidez também há desnaturação (como acontece quando usamos sumo de limão para marinar peixe cru). Um outro aspeto importante que as células usam nas suas moléculas é a sua assimetria. Qualquer configuração de molécula não simétrica possui uma propriedade chamada *quiralidade*.

Coloquemos o livro que estamos a ler em cima da mesa e viremos as nossas mãos com as palmas para cima. Apesar de serem essencialmente iguais podemos verificar facilmente ser impossível sobrepor uma exatamente por cima da outra. Uma delas é quase a imagem da outra ao espelho, e quer rodemos ou viremos a mão direita nunca a conseguiremos colocar exatamente como a mão esquerda.

O mesmo se passa com muitas moléculas dentro da célula: têm uma quiralidade particular. Para isso essas moléculas têm carbonos assimétricos, ou seja, átomos de carbono ligados a quatro outros átomos e/ou grupos de átomos diferentes. É o que acontece nas moléculas da figura. Estas duas versões, espelho-imagem, de duas moléculas designam-se por isómeros enantiómeros e são diferentes entre si como a mão direita é da mão esquerda (Dartnell, 2007, p.8-13).

Ora, é intrigante que toda a vida na Terra só use um dos enantiómeros. Todos os aminoácidos produzidos pela vida são do tipo do indicado em cima da mão esquerda enquanto todos os açúcares são do tipo do indicado em cima da mão direita. Contudo se tentarmos simular a química pré-biótica na Terra primitiva acabamos sempre por obter uma mistura dos dois enantiómeros.

Compreender que a vida só utilize um dos enantiómeros até é simples - as enzimas que executam o metabolismo são tão específicas que só funcionam se a molécula alvo tiver a quiralidade correta. Seria um enorme desperdício a vida utilizar os dois enantiómeros em cada enzima, de modo que a vida decidiu por um deles. Mas aí é que está o mistério - o que é que causou essa seleção?

Onde estão armazenados os planos de montagem de tudo o que é fabricado permanentemente numa célula? Quais os mecanismos que as moléculas da vida utilizam para armazenar, comunicar e copiar a informação genética? Como é que extraem a energia para viverem?

1.1.5. Armazenamento da informação

O manual de operações de uma célula está codificado na macromolécula do **ácido desoxirribonucleico** normalmente representada por DNA (ou ADN).

O DNA é um polímero, um longo filamento de unidades que se repetem - os nucleótidos. E cada nucleótido é construído por três partes: um *açúcar*, uma *base* e um *grupo fosfato*. A cadeia de DNA é enorme podendo ter biliões de nucleótidos. Uma molécula de ADN do ser humano possui aproximadamente 2 m de comprimento, enclausurada num núcleo celular de 6 µm, o equivalente a acomodar uma linha de 40 km de comprimento numa bola de ténis.

O *açúcar*, *desoxirribose*, tem a forma de um pentágono com quatro átomos de carbono e um de oxigénio. A *base* pode ser uma entre quatro: adenina, guanina, timina ou citosina abreviadamente A, G, T e C, cada uma contendo átomos de carbono e de nitrogénio. Estas são as letras do código genético. A estrutura do polímero é formada por moléculas de açúcar ligadas umas às outras por *grupos fosfato*, situando-se as bases de lado. Dois cordões alinhados lado a lado ligam-se se as suas sequências de bases correspondem, A sempre com T e G com C. Isto forma a famosa estrutura helicoidal do DNA: dois filamentos enrolados um no outro, ligados, tal como os degraus de uma escada em caracol, por bases. É uma estrutura elegante que é a chave tanto para as capacidades de armazenamento como para as habilidades reprodutivas destas moléculas. A sequência de letras genéticas especifica como construir proteínas e a construção do DNA em escada significa que pode servir de modelo para a sua própria duplicação. Como os três domínios da célula partilham do

mesmo código genético, então este deve-se ter desenvolvido, antes de ter divergido. Isto é a melhor evidência que temos de que toda a vida na Terra tem a mesma raiz.

A cópia da informação genética é feita durante a divisão da célula. Para isso é necessário um exército coordenado de enzimas. Umas vão desenrolando a hélice à medida que se deslocam, outras ligam nucleótidos livres às bases expostas e outras juntam-nas para formar dois novos filamentos completos.

O DNA armazena a informação de como construir as partes de uma célula e as proteínas copiam-nas sempre que a célula se divide. Mas o DNA por si só não consegue construir proteínas. Um intermediário, o RNA, transporta a informação do DNA para a maquinaria celular onde há ribossomas, que as constroem. Mas as proteínas também desempenham outra função importante, gerando energia útil.

1.1.6. Extração de energia

Um fungo extrai energia de um toco de madeira oxidando as moléculas que a constituem. A oxidação não apenas envolve a adição de oxigénio a uma molécula (ou remoção de hidrogénio) mas também a retirada de um eletrão. A redução é o processo inverso, no qual um eletrão é dado a uma molécula. As duas ocorrem simultaneamente e no fundo, o que se passa é apenas a troca de eletrões: estes são tirados ao redutor e recebidos pelo oxidante. É uma reação redox.

Quase todos os eucariontes extraem a energia quebrando moléculas de hidratos de carbono (tal como a do açúcar glicose) e oxidando-as para produzir H_2O e CO_2 . Os seres humanos necessitam de O_2 , pois as suas células usam esta molécula como aceitador final de eletrões: estes são retirados aos hidratos de carbono, passam por uma longa cadeia de moléculas intermediárias para produzir trabalho para a célula e por último são dados ao oxigénio para produzir água. Este processo chama-se respiração e ocorre dentro das mitocôndrias.

1.1.6.1. Respiração

O que se passa é semelhante a uma pilha. Uma pilha tem dois elétrodos: o positivo (cátodo) onde ocorre a redução e o negativo (ânodo) onde ocorre a oxidação. Se ligarmos exteriormente estes dois elétrodos por um fio metálico uma corrente de eletrões percorre-o do polo negativo para o polo positivo. Ora, esta corrente elétrica pode ser utilizada para realizar trabalho (Dartnell, 2007, p.14-15).

Quantitativamente, diz-se que um elétrodo tem um determinado potencial elétrico, V , sendo, $V_{\text{elétrodo positivo}} > V_{\text{elétrodo negativo}}$. Além disso quanto maior é a diferença de potencial entre os dois tanto maior é a quantidade de energia que se pode disponibilizar por unidade de carga transferida.

A reação redox que se dá pode ser descrita globalmente por,



Da oxidação da glicose, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, dá-se uma libertação de energia muito elevada. Mas nesta equação só temos o início e o fim. O que se passa durante é muito complexo.

A glicose, resultante da digestão, é submetida a uma transformação em 11 etapas que tem lugar na ausência de oxigénio. No termo deste processo, que liberta pouca energia, a molécula é dividida em duas partes de 3 átomos cada. Estes dois fragmentos são então introduzidos num grande ciclo de reações designado por ciclo de Krebs que se dá na mitocôndria dos eucariontes ou no citoplasma dos procariontes. Liberta-se aí dióxido de carbono e eletrões, ricos em energia. Ora esta energia é utilizada para recarregar o ADP em ATP (cerca de 55% da energia da glicose fica então armazenada no ATP). Alguns dos eletrões são também utilizados para construir moléculas redutoras complexas. No termo do percurso, os eletrões combinam-se com o oxigénio que por sua vez atrai iões hidrogénio, H^+ , para formar de novo água. E o ciclo completa-se.

Este processo diz-se aeróbio (efetuado perante oxigénio) e a sua eficiência global é de 40%. O oxigénio está aqui para aceitar todos os eletrões no final mantendo o ciclo.

Alguns eucariontes e muitas bactérias existentes em ambientes onde o oxigénio é escasso, como nos sedimentos marinhos e lacustres ou próximos de fontes hidrotermais, têm uma respiração anaeróbia (sem oxigénio). Neste caso, o aceitador final de eletrões não é o oxigénio mas outro composto contendo enxofre, ou nitrogénio, etc. É o que acontece no processo de fermentação, que só liberta 1/10 da energia armazenada. Neste caso a oxidação dos hidratos de carbono é apenas parcial, até ao ponto de entrada no ciclo de Krebs e depois convertida em resíduos (tal como o álcool no caso da levedura de cerveja) e expelidos para fora da célula.

1.1.6.2 Energia inorgânica

Os eucariontes, em geral, só se conseguem alimentar de coisas que possam passar diretamente pelo ciclo de Krebs. Mas os archaea e as bactérias são capazes de viver fora de quase todas as fontes de alimentos que se possa imaginar. De facto, os procariontes têm o seu ponto forte numa diversidade metabólica muito maior.

Em princípio, qualquer reação redox liberta eletrões que podem ser usados para dirigir o mecanismo celular. Por exemplo, iões Fe^{2+} podem ser oxidados a iões Fe^{3+} originando um eletrão livre:



O íon Fe^{2+} origina soluções verdes: quando perde um elétron, transforma-se em Fe^{3+} e a cor muda para um vermelho acastanhado, a cor da ferrugem, rochas marcianas e sangue humano. Na presença de algo com um potencial de oxidação maior, que possa atuar como aceitador de elétrons, o Fe^{2+} vai ser oxidado numa reação global que nada mais é que uma bateria biológica, com o fluxo de elétrons a gerar ATP e alimentar as atividades das células (Dartnell, 2007, p.16-21).

Alguns procariontes usam o oxigênio como principal aceitador de elétrons - são os **aeróbios**. Muitos não, e até podem ser envenenados pelos efeitos deste agente oxidante poderoso - são os **anaeróbios**.

Alguns procariontes têm como aceitadores finais de elétrons, íons de metais pesados tais como íons de arsênio que são venenosos para outras células. Outros podem realizar ambas as respirações: aeróbia e anaeróbia. Algumas bactérias reduzem íons de urânio para pôr a funcionar o seu metabolismo. É até possível que a vida no início tenha usado indiretamente a energia nuclear para dirigir a sua bioquímica: a abundância de isótopos radioativos de urânio, tório e potássio terá sido bem maior na Terra primitiva do que agora. Ora, sendo estes instáveis libertam radiação ao sofrerem decaimento, podendo dar um impulso energético às moléculas das vizinhanças. Alguns cientistas acreditam que uma substancial quantidade de moléculas orgânicas reduzidas podem ter sido produzidas desta maneira e metabolizadas pela vida nas rochas. Estas células teriam sido alimentadas por reações nucleares.

Assim, muitos procariontes extraem a sua energia metabólica de reações inorgânicas. Alguns nem sequer necessitam aceder a moléculas orgânicas como fonte de carbono para os seus blocos construtores celulares. São completamente autossuficientes e conseguem construir tudo o que necessitam a partir do zero, transformando compostos básicos como o CO_2 em todas as moléculas biológicas que precisam.

Os organismos podem ser classificados pelos dois fatores: necessidades em energia e fonte de carbono. (ver tabela)

Fonte de carbono		Fonte de energia	
orgânica	<i>hetero-</i>	dador de elétrons orgânico	organo-
CO_2	<i>auto-</i>	dador de elétrons inorgânico	lito- / quimio-
		luz do sol	foto-

Por exemplo, uma célula humana é um *organoheterotrófico*, uma bactéria que sobrevive em reações químicas inorgânicas mas necessita de um suplemento externo de energia em açúcares é um *litheterotrófico*, enquanto uma *archaea* que usa substâncias inorgânicas não apenas para as suas exigências de energia mas também como fonte de carbono é um *quimioautotrófico*.

A *fixação do carbono* é a conversão de CO_2 inorgânico em moléculas orgânicas. Alguns dos *quimioautotróficos* que fazem isto vivem nas profundezas subterrâneas, extraíndo os iões e o CO_2 de que necessitam dos minerais que os rodeiam; quase literalmente, “comem pedras ao almoço”. E estes tipos de organismos são os favoritos para a vida extraterrestre principalmente para distâncias muito afastadas do Sol. Fotoautotróficos são os organismos que usam a energia da luz do Sol para fazer funcionar o seu metabolismo e fixar o carbono em hidratos de carbono. Este processo, *fotossíntese*, é de tremenda importância para a biosfera da Terra.

*“O que mantém a vida em movimento é uma
pequena corrente elétrica mantida pela luz do sol.”*
A. Szent Györgyi

1.1.6.3. Fotossíntese

Na fotossíntese, tal como na respiração, há libertação de eletrões para efetuar trabalho para a célula. A fotossíntese tem duas partes fundamentais: a primeira capta a energia da luz e a segunda usa essa energia para fixar o carbono.

Na primeira temos a **clorofila**, uma classe de compostos que contém magnésio. As suas moléculas são extremamente eficientes em absorver luz visível, excitando os eletrões dentro da sua estrutura. A energia destes eletrões excitados é utilizada para decompor a água, obtendo-se, oxigénio, que escapa como desperdício, hidrogénio ativo e mais eletrões. Nesta parte também é gerado ATP.

A segunda parte da fotossíntese não necessita da luz. Sob a ação da enzima *rubisco* os eletrões são de novo excitados e as moléculas de ATP e hidrogénio ativo são utilizados para criar a molécula da glicose. Alguns dos produtos são desviados para criar todos os hidratos de carbono que a planta necessita.

Globalmente, a fotossíntese gera ATP e fixa o CO_2 em hidratos de carbono, obtendo os eletrões as suas necessidades ao decompor a água para libertar O_2 . Assim há energia bioquímica e compostos de carbono reduzidos, as duas necessidades fundamentais das células. Hoje, os organismos fotossintéticos fixam cerca de dez mil biliões de toneladas de carbono todos os anos, suportando toda a biosfera.

A crosta terrestre tem um potencial redox negativo natural; a atmosfera e oceanos estão ligeiramente mais oxidados, pela ação da luz do Sol e radiação. Isto cria um gradiente eletroquímico (ou diferença de potencial) entre a crosta e a água+atmosfera situados acima - uma bateria do tamanho do planeta. Pois bem, muitos litotróficos retiram energia, vivendo precisamente na interface, fazendo reagir os iões reduzidos na crosta com os oxidados de cima. Ora, a fotossíntese tem atuado para aumentar o

gradiente de energia, com as substâncias orgânicas muito reduzidas reunidas nos sedimentos sobre a terra e no fundo do mar e o oxigénio a ser libertado para o ar e água. Ao longo do tempo a diferença de potencial de todo o planeta tem aumentado.

Muitas das reações redox ocorrem naturalmente, logo a única forma que a vida tem de as usar para extrair energia é fazê-las ocorrer mais depressa do que normalmente acontece. Assim que as substâncias atinjam o equilíbrio não há gradiente de energia e a vida extingue-se. É devido a isto que as enzimas são tão importantes; permitem que a vida supere os processos geológicos que eventualmente eliminem o gradiente. Por exemplo, a oxidação do ião Fe^{2+} a Fe^{3+} , (formação da ferrugem) normalmente demora anos, de modo que as enzimas podem facilmente melhorar isso e manter-se à frente. Algumas

reações não ocorrem de todo a baixas temperaturas, sem a ação da vida, enquanto outras, tais como a reação entre o óxido de

ferro e o sulfureto de hidrogénio dão-se de tal modo rapidamente que as enzimas não conseguem fazer melhor.

1.1.7. Haverá outros caminhos?

Poderá a vida noutra planeta ser igual à existente aqui?

Ora, os blocos construtores utilizados pela vida terrestre, açúcares, aminoácidos e bases, já existem no espaço fora da Terra. Foram produzidas nas grandes nuvens interestelares e durante a formação do Sistema Solar. Poderão estas subunidades, ou outras ligeiramente diferentes daquelas que a vida na Terra escolhe, ser colocadas juntas de outras maneiras para criar seres vivos? Será a construção do RNA e do DNA

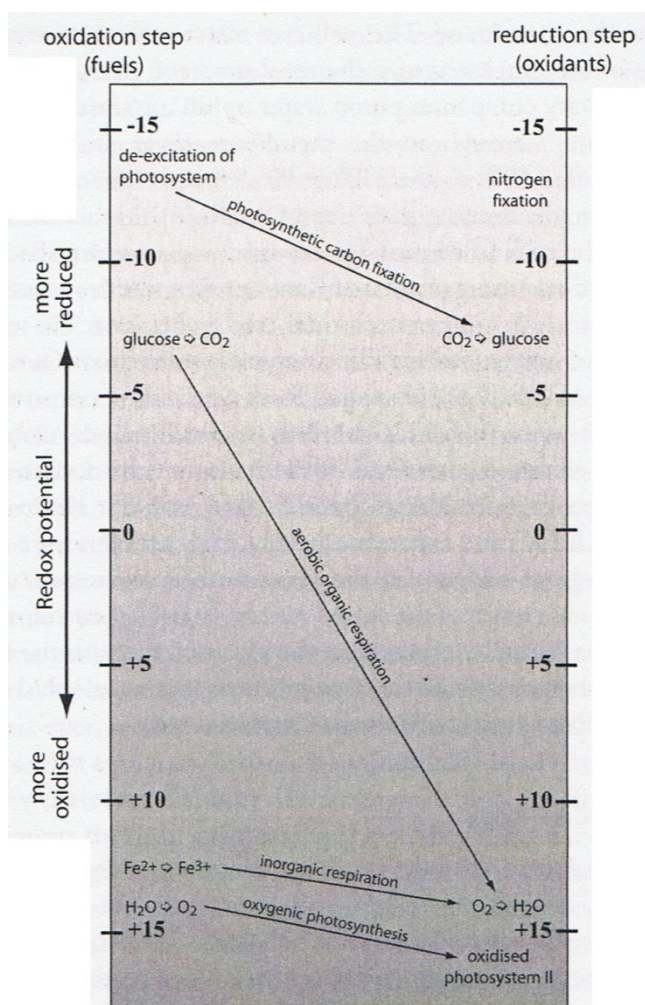


Fig.4 A "escada" dos pares redox. A vida só extrai energia das reações que prosseguem "para baixo" como as que fazem reagir glucose ou Fe^{2+} com oxigénio. Energia deve ser absorvida pelo sistema para levar a cabo reações tais como fixar carbono em glucose (e.g. energia luminosa na fotossíntese) ou fixação do nitrogénio. Quebrar a molécula da água requiere enorme poder oxidante, como fornecido pelo fotossistema II nas cianobactérias e cloroplastos.

única ou poderá haver outras moléculas semelhantes a desempenhar um trabalho adequado? O que terá de tão especial a química baseada no carbono ou o uso da água como solvente? Começemos pelo RNA/DNA

1.1.7.1 RNA/DNA

Antes de existirem células, num tempo em que as moléculas replicadoras habitavam a Terra, a química pré-biótica teria produzido uma grande variedade de açúcares e bases. No entanto, toda a vida atual da Terra só usa dois polímeros para armazenar toda a informação genética. O que é que há de tão especial nas subunidades particulares utilizadas no RNA e DNA? Serão superiores às alternativas ou a sua sobrevivência é uma casualidade?

Ora o predomínio do RNA pode muito bem ser o resultado de um acidente. Para abordar a questão de haver substitutos funcionáveis para o RNA e DNA, foram criadas alternativas artificiais. O DNA e o RNA são constituídos por três partes: um açúcar, um grupo fosfato e uma base. Verificou-se ser relativamente fácil trocar as bases por outras fabricadas em laboratório - é o mesmo que mudar as letras do alfabeto genético - sem distorcer globalmente a estrutura do DNA, continuando-se a formar a dupla hélice. O DNA extraterrestre provavelmente não usa estas alternativas pois estas são menos prováveis de se formar nos processos pré-bióticos que se pensa ocorrerem nas nuvens de gás interestelares ou nos planetas nos seus primórdios.

Muitas experiências foram feitas em RNA. Pensa-se que é anterior ao DNA na evolução da vida. O RNA terrestre é construído a partir de açúcares com cinco átomos de carbono. Em laboratório foram analisadas duas modificações: as ligações entre açúcares vizinhos foram feitas em diferentes átomos de carbono dentro do anel ou utilizaram-se moléculas de açúcar diferentes. No nosso RNA, os grupos fosfato ligam-se nos carbonos 3 e 5 de açúcares vizinhos; no laboratório ligou-se ao 2 e 5. Ora, o filamento tornou-se muito mais vulnerável à ruptura e a força de emparelhamento de bases ficou severamente enfraquecida (Dartnell, 2007, 22-24).

A ribose pode ter vários isómeros (nestes os átomos são os mesmos mas a sua disposição é diferente). RNA feito de diferentes isómeros demonstraram ter ligações entre pares de bases mais fortes, logo, hélices mais estáveis que o RNA nativo. Ora, pode concluir-se que não foi só o critério de estabilidade que foi importante para a seleção do RNA. Talvez um grau moderado na força de ligação entre pares de bases seja melhor pois permite uma separação mais fácil dos dois filamentos durante a replicação. Além disso, hélices com fortes ligações entre pares de bases tendem a cometer mais erros, ligando sequências que não correspondem perfeitamente.

Também se mudaram os açúcares no RNA, substituindo a ribose, com 5 átomos de carbono, por açúcares com 6 ou 4 átomos de carbono. O resultado não foi animador: a glicose (tem 6 átomos de carbono) não originou bons polímeros de armazenamento de informação. A ligação entre pares de bases é inadequada: é muito fraca e há muito menor especificidade no emparelhamento entre bases (A também pode emparelhar com G, e não só com T). Os resultados com quatro átomos de carbono (treose) foram muito mais interessantes. Formou-se o polímero TNA, que permite emparelhamento entre bases com precisão e estabilidade semelhante às do DNA e pode formar uma dupla hélice perfeita. Além disso também se pode cruzar com o DNA e o RNA, algo impossível para a maior parte das outras alternativas. Este açúcar também se revelou ser mais fácil de se formar na química pré-biótica, logo o TNA é muito mais provável ter surgido na Terra primitiva.

As experiências com dignos competidores do DNA acabarem por terminar em muitos becos sem saída. Muitos polímeros alternativos não conseguem formar hélices estáveis ou são inferiores ao RNA em muitos outros aspetos. A sensação é de que a vida extraterrestre que se poderá ter desenvolvido a partir de uma química pré-biótica semelhante à da Terra primitiva ou usou RNA ou uma molécula muito semelhante, para armazenar a sua informação genética. Contudo as possibilidades alternativas ao RNA/DNA de açúcares, colocação de ligações e bases são muitas e só agora começaram a ser exploradas.

1.1.7.2 Carbono

A química polimérica é essencial para o nosso tipo de vida que usa os polímeros de ácidos nucleicos, DNA e RNA, para armazenar e transmitir informação e polímeros de hidratos de carbono, tais como os amidos, como arsenais de energia. E o carbono forma a “espinha dorsal” de todas estas moléculas; sem ele, a vida seria, muito simplesmente, impossível. É muito difícil imaginar outro elemento com uma tal propensão para construir moléculas com a complexidade necessária para a vida.

O **silício** é uma das alternativas mais mencionadas. Está situado logo por cima do carbono, na Tabela Periódica dos elementos, logo tem um comportamento semelhante àquele em reações químicas. Pode, por exemplo, formar quatro ligações covalentes simples. O átomo de silício é maior do que o carbono o que significa que se forma menos no núcleo das estrelas e por isso mesmo o Universo tem mais carbono do que silício. Contudo, devido ao processo que criou o sistema solar, o silício é muito mais abundante que o carbono na Terra - cerca de trinta por cento da crosta - e também em qualquer dos planetas rochosos. Considerando isto, se a química complexa do silício

fosse possível na Terra, então a vida seria baseada no silício em vez do seu primo químico, o carbono.

Então porque é que isso não acontece? Por ter um átomo maior as ligações que forma com outros átomos são geralmente mais fracas que aquelas que o carbono forma, produzindo polímeros muito fracos, pelo menos nas condições que prevaleceram ao longo de toda a história da Terra. No entanto, em condições muito diferentes tais como altas pressões e altas ou baixas temperaturas, o silício pode de facto formar polímeros bastante resistentes (Dartnell, 2007, p. 25-29).

Uma outra dificuldade é o composto que forma com o oxigénio. Os polímeros de carbono podem ser oxidados, como na respiração dos hidratos de carbono para libertar dióxido de carbono. O processo análogo com o silício forma o dióxido de silício que é areia. É um sólido, duro, insolúvel: muito duro para a vida.

A razão decisiva para favorecer uma vida baseada no carbono, pelo menos na nossa parte da galáxia, é de que os blocos construtores orgânicos são os mais abundantes através do espaço. Pensa-se que os planetas nos seus primórdios ficaram totalmente inundados de carbono vital muito cedo no seu desenvolvimento. Compostos semelhantes do silício não são observados no espaço, logo a procura da vida baseada no carbono é a única opção sensata.

1.1.7.3. Água

Dependerá a vida extraterrestre da água?

Não se sabe. No entanto a água tem uma impressionante lista de capacidades. Primeiro, é um solvente excecional. As moléculas de águas são polares. E podem formar ligações de hidrogénio entre si e com outras moléculas polares ou iões permitindo que estas se dissolvam facilmente. E estando dissolvidas estão também disponíveis para as rápidas reações da vida; o que ajuda a aglomerar os nutrientes essenciais e expelir os produtos desperdiçados.

A vida orgânica num estado sólido é impossível; as moléculas estão enjauladas e incapazes de se mover e reagir. Num estado gasoso, a vida tem a dificuldade oposta das moléculas se moverem rapidamente afastando-se umas das outras e nunca atingindo concentrações suficientemente altas para as reações serem rápidas.

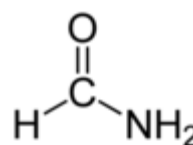
As ligações de hidrogénio também possibilitam que a água seja líquida num vasto domínio de temperaturas (entre 0 °C e 100 °C à pressão normal ao nível do mar). A água também se expande quando solidifica. Assim, dos 0°C aos 4°C, fica menos densa do que quando é sólida o que permite ao gelo flutuar em cima de água líquida,

isolando-a e, impedindo que toda ela solidifique. A água também pode absorver uma grande quantidade de calor sem grande aumento de temperatura pois este aumento pode danificar as moléculas biológicas. Funciona assim como um excelente tampão térmico, protegendo as células de grandes oscilações de temperatura e impedindo a perturbação de atividades vitais, como a ação das enzimas. É quimicamente muito útil, pois tanto o oxigénio como o hidrogénio participam em reações de hidratação que quebram as proteínas ou os polímeros de amido nas suas subunidades.

Poderá haver outros solventes adequados para a vida?

Está estabelecido que a natureza polar da água é essencial para a correta dobragem e funcionamento das proteínas. Mas há moléculas designadas por peptóides, quimicamente muito semelhantes a proteínas que se podem dobrar em metanol puro.

Ora será que as propriedades da água estão fortuitamente aperfeiçoadas para a vida ou será que é a vida na Terra que está aperfeiçoada para um ambiente de água? Pode acontecer até que a vida terrestre tenha evoluído para explorar as propriedades específicas da água simplesmente porque a água é o único solvente disponível em grandes quantidades no nosso planeta. A vida terrestre está bem adequada à água, mais do que o contrário e poderá não haver uma boa razão química para que a vida não possa surgir noutros solventes. Em certos aspetos a água até é inapropriada para a vida: é muito reativa e tende a quebrar moléculas orgânicas complexas. O RNA, por exemplo, tem um tempo de vida muito curto em água.



Quais as alternativas?

O amoníaco puro é líquido entre -78 °C e -33 °C à pressão atmosférica normal (um domínio de 45°C pouco menos de metade do da água) e também pode formar ligações de hidrogénio para dissolver muitas substâncias orgânicas. É também um composto muito comum na galáxia, presente nas nuvens de poeiras do espaço exterior e como gotículas líquidas nas nuvens de Júpiter. Uma mistura de amoníaco com água pode existir a temperaturas muito inferiores à do ponto de fusão da água representando um solvente híbrido. Isto é particularmente relevante pois pode haver aquíferos de água e amoníaco debaixo da superfície de Titã. Outra substância química, formamida, é líquida num domínio enorme de temperaturas e pressões, dissolve sais e tem outras propriedades semelhantes às da água. Outros possíveis solventes incluem o metano (fluido na Terra a, -160 °C) e azoto líquido (fluido a, -196 °C). Contudo as temperaturas baixas são um grande problema para uma bioquímica orgânica e mesmo nos solventes líquidos a química é muito diferente. Quanto menor a

temperatura mais lentos são os processos e mais eficaz tem de ser uma enzima para obter reações a um ritmo considerado útil. A estas temperaturas as reações bioquímicas podem ser tão lentas que a vida se torne impossível.

Tal como uma vida não baseada no carbono, uma ecologia não baseada na água é tão extraterrestre que se torna difícil conceber experiências ou instrumentos para enviar para outros mundos.

1.2 OS EXTREMÓFILOS

A faísca que inflamou o interesse na possibilidade de vida noutros mundos foi a descoberta da chamada vida extremófila na Terra - organismos a desenvolver-se em ambientes hostis previamente considerados como absolutamente estéreis. Há até a sensação de que em qualquer local que tentemos verificar se há vida, a vamos mesmo encontrar. A vida, uma vez iniciada, parece superiormente imparável, arranjando sempre maneiras de se adaptar para preencher todos os nichos possíveis. Há evidências de água líquida em muitos planetas e luas do sistema solar: de facto tende a ser abundante em qualquer planeta a uma distância apropriada da sua estrela. Por estas razões óbvias, estas descobertas nos extremos do nosso próprio mundo são tremendamente importantes (Dartnell, 2007, p. 30-36).

1.2.1. As biosferas

Há três parâmetros que afetam o funcionamento da biologia celular: temperatura, acidez e salinidade. Diversos organismos conseguem sobreviver em diferentes domínios destas condições. Pode-se construir para todas as células um gráfico tridimensional com estas três condições para mostrar o domínio da vida na Terra. Obtém-se a *biosfera de sobrevivência* da vida com forma de nuvem. Ora há zonas nesta nuvem inchada que se sobrepõem com condições que se acredita existirem noutros planetas ou seja, em termos destes três parâmetros, certas formas de vida terrestres ficariam satisfeitas em ambientes extraterrestres.

A célula eucariota é complexa logo muito sensível aos extremos físicos e químicos, de modo que muitas das regiões exteriores da biosfera de sobrevivência estão povoados apenas por procariontes.

1.2.1.1. Temperatura

Como a vida para existir requer água líquida, então os limites de temperatura absolutos de sobrevivência são definidos pelos, ponto de fusão e ponto de ebulição da água. Ora, o ponto de fusão e o ponto de ebulição podem ser modificados dos limites de 0°C a 100°C aos quais somos familiares, por vários fatores.

Se misturarmos sal com água o seu ponto de fusão diminui. É o que acontece quando, no interior do país se deita sal nas estradas para impedir que se forme gelo no inverno. Há bolsas de água salgada dentro de gelo sólido que podem permanecer líquidas a temperaturas de -20°C.

Se aumentarmos a pressão o ponto de ebulição aumenta também. É o que se passa nas panelas de pressão. Nas zonas mais profundas dos oceanos a água apenas começa a ferver a temperaturas próximas de 400 °C.

Sabemos que baixar temperaturas frequentemente não é problema. Muitos organismos podem ser congelados e depois reanimados. Há vários exemplos disto: clínicas de fertilidade armazenam regularmente ovos em nitrogénio líquido a, -200°C ; há animais que hibernam. Há quem pense em viagens planetárias congelando os corpos dos tripulantes durante anos até próximo do destino mas para já não passa de ficção científica. Ora, há bactérias que vivem bem no frio - os **psicrófilos** e **psicrotrófilos**.

A baixas temperaturas, as proteínas das células, em especial as enzimas, podem tornar-se muito rígidas. A função catalítica das enzimas depende delas serem capazes de modificar formas mas quanto mais frio for, menores são as vibrações térmicas que as ajudam a ser flexíveis. Como é que as células resolveram este problema? Desenvolvendo enzimas com ligações mais soltas, o que significa que permanecem flexíveis, mesmo a muito baixas temperaturas, permitindo que o metabolismo funcione. E as suas membranas celulares são mantidas muito móveis. O perigo que estas células correm é que se a temperatura descer demasiado, essas ligações podem sofrer desnaturação tal como acontece ao fritar um ovo. Nessa desnaturação o DNA perde a sua estrutura tridimensional. Assim as bactérias adaptadas ao frio podem ficar cozidas abaixo dos 20°C .

Psicotrófilos sentem-se em casa nas águas da Antártida e nos sedimentos dos oceanos profundos. Alguns continuam ativos mesmo a temperaturas de -20°C . À medida que a água do mar congela o sal torna-se cada vez mais concentrado em pequenas bolsas, impedindo que a água dentro delas solidifique, produzindo um labirinto de canais interligados e poros. A estas temperaturas tão baixas a reprodução torna-se muito lenta com tempos até seis meses (uma bactéria que vive dentro dos intestinos humanos, divide-se em duas de 20 em 20 minutos). Ora, a maior parte da biosfera da Terra é fria - mais de 90% da água do mar encontra-se abaixo de 5°C e os organismos adaptados a estas tão altas pressões das águas profundas (**barófilos**) tendem a ser psicrófilos.

Organismos que gostam do calor, **termófilos**, enfrentam dificuldades opostas. Para isso desenvolveram enzimas com ligações extra, para impedir que se afastem umas das outras a altas temperaturas e membranas com reduzida fluidez. Apesar das temperaturas elevadas permitirem reações químicas mais rápidas, o que parece uma vantagem, acima de 150°C muitas moléculas orgânicas decompõem-se. Isto coloca um limite absoluto superior de sobrevivência e nenhum organismo foi ainda isolado que conseguisse aguentar temperaturas acima de 121°C . A maioria dos organismos tolerantes a temperaturas altas - **hipertermófilos** - são archaea. Eucariotas são comparativamente fracos: só conseguem viver até 60°C ou 70°C . A 75°C a clorofila

degrada-se logo, em piscinas quentes pouca fotossíntese acontece. Mas a solubilidade de gases tais como oxigénio e dióxido de carbono diminui com a temperatura e assim muitos hipertermófilos são anaeróbicos.

Os termófilos encontram-se em ambientes tais como os flancos dos vulcões e à volta dos geysers e fontes geotermiais quentes. Estes locais são normalmente ricos em substâncias químicas redutoras do interior da Terra e assim muitos termófilos são quimioautotróficos reagindo com o hidrogénio, ião ferroso ou reduzindo compostos de enxofre com aceptadores de eletrões tais como o oxigénio ou NO_3^- . Extrair energia oxidando compostos de enxofre tem um efeito colateral bastante desagradável: estas reações produzem, H_2SO_4 , e as águas geotérmicas ficam muito ácidas. Nas piscinas vulcânicas quentes do Yellowstone Park nos EUA borbulham gases sulfurosos extremamente ácidos. Nas bordas destas piscinas, há minerais em diferentes estados de redução o que se nota nas cores exibidas criadas por termófilos e a água torna-se mais quente, mais reduzida e menos acídica à medida que a profundidade aumenta.

1.2.1.2. Acidez

A acidez é avaliada na escala do pH, a qual mede a concentração de iões H_3O^+ ou iões H^+ (aq). Soluções ácidas têm baixos valores de pH; Soluções alcalinas têm valores elevados de pH (a 25° C, $\text{pH} = 7$ define uma solução neutra).

Os **acidófilos** são espécies que conseguem viver a pH baixo. Algumas destas espécies foram descobertas quando a fruta enlatada se estragava; outras são comuns nas piscinas hidrotermais ou na água que escorre para fora das minas de metal onde o minério é muito rico em enxofre. Algumas conseguem sobreviver a $\text{pH}=0$, 100 vezes mais ácido que o sumo de limão. A elevada acidez combinada com elevada temperatura torna-se extremamente destrutiva para estes organismos. Logo os organismos mais acidófilos só podem tolerar apenas 60° C.

A principal dificuldade que os acidófilos enfrentam é a estabilidade das suas proteínas. A estrutura tridimensional exata de um filamento de proteína é mantida unida por diferentes tipos de ligações e estas podem ser grandemente perturbadas por variações nas distribuições das cargas, como acontece aumentando a acidez. Os acidófilos protegem as suas proteínas, incluindo mais aminoácidos com grupos laterais neutros ou mantendo o interior das suas células tão neutros quanto possível. Fazem isto retirando para fora protões à medida que eles voltam para trás através da membrana, ou transformando-os para tirar vantagens. Por exemplo, certos organismos oxidam o ferro fora da célula e transportam o eletrão libertado para dentro para ligar oxigénio e iões hidrogénio e criar água. Isto retira protões do interior da célula e àqueles que estão de fora é permitido fluir para dentro e gerar energia.

Os **alcalífilos** são organismos que sobrevivem em águas muito alcalinas, tal como nos lagos de soda do oeste dos EUA. Estes organismos toleram pH até 11 - semelhante ao do amoníaco doméstico. Nestas circunstâncias, as concentrações de iões hidrogénio são muito baixas e as células tem problemas para gerar potência e outros iões essenciais, tais como o Mg^{2+} e o Ca^{2+} , precipitam na água como sais e, deste modo, estão disponíveis a níveis muito baixos. Estes alcalífilos enfrentam esta situação, importando estes iões e exportando outros para manter o seu interior próximo da neutralidade.

1.2.1.3. Salinidade

Os **halófilos** que sobrevivem em ambientes salinos, têm de se debater com um difícil balanço osmótico (a diferença nas concentrações de solutos entre o interior e o exterior da célula). No fenómeno da osmose a água tende a mover-se para zonas com maiores concentrações de solutos: isto é, do menos concentrado para o mais concentrado. Logo as células que vivem num ambiente muito salino correm o perigo de perder toda a sua água para o exterior, isto é, dessecarem. Combatem isto utilizando duas estratégias (Clancy, Brack & Horneck, 2005, p. 67-68). Na primeira, encontrada em algas eucarióticas e muitas bactérias, são acumuladas dentro do citoplasma da célula pequenas moléculas de compostos orgânicos, designados por solutos compatíveis tais como, aminoácidos ou glicerol. Assim, a maquinaria interna da célula fica efetivamente protegida do ambiente extremo exterior. Na segunda, mais radical, encontrada maioritariamente em halofílicos archaea, são acumuladas altas concentrações de KCl e $MgCl_2$ (próximas da saturação) no citoplasma provenientes do exterior. Logo a própria maquinaria celular fica em contacto com sais em concentrações muito elevadas, adaptando-se a elas. Assim as proteínas só são ativas para altas concentrações de sais sendo destruídas se estes forem removidos.

Ambientes hipersalinos são criados por elevadas taxas de evaporação de água dos lagos, tal como no Mar Morto, ou por água muito salgada aprisionada nas bacias oceânicas. A alta salinidade parece ser uma das características que exigem menos restrições físicas: mesmo alguns organismos superiores conseguem sobreviver nos extremos. É frequente observar em lagos de água salgada ecossistemas de camarões de água salgada a alimentar-se de densas proliferações de algas mas à medida que a água evapora e a salinidade se aproxima do ponto de saturação a 35% - dez vezes mais concentrada do que a água do mar - apenas os archaea halófilos permanecem.

1.2.1.4. Extremófilos eucariontes

Os eucariontes são cheios de exemplos assombrosos de extremófilos. E são muito relevantes quanto à possibilidade de existirem ecossistemas complexos fora da Terra. Apesar das células eucariontes não conseguirem aguentar longos períodos em algo mais quente que 60 °C, muitos mais destes organismos lidam bem com o frio extremo. Os griloblatídeos são insetos que limpam as camadas de gelo de animais mortos pelo frio, nos cumos das montanhas. São melhor conhecidos por insetos do gelo e estão ativos a temperaturas muito abaixo do ponto de fusão (se pegarmos um deles na palma da mão é suficiente para morrer). Estes insetos, por causa da baixa temperatura, crescem e desenvolvem-se muito lentamente, demorando sete anos para completar uma geração. Há uma planta americana, que pode crescer mesmo quando o terreno à volta congela. Realiza isto em parte usando o gradiente de protões estabelecido na respiração não para fazer ATP mas para gerar diretamente calor para descongelar o solo circundante.

Talvez os mais notáveis sejam os *tardígrados* ou ursos de água. Estes animais microscópicos medem menos de 1 mm da cabeça à cauda e têm oito pernas curtas, superficialmente parecidos com artrópodes tais como as lagostas. São comuns em manchas de musgos húmidos em quase toda a parte dos trópicos até aos polos. Em situações muito difíceis, adquirem a forma de um barril e hibernam deste modo indefinidamente. Com essa forma, os tardígrados podem lidar com praticamente qualquer perigo - temperaturas de -235 °C a +150 °C, raios X intensos, pressões muito elevadas, ou o vácuo. Verdadeiros sobreviventes do mundo animal são um bom modelo para o tipo de vida complexa que poderá ser encontrada em qualquer lado.

1.2.2. Ambientes propícios à vida

Os seres vivos não vivem isolados do seu meio ambiente e tudo o que se passa à sua volta é vital para o seu desenvolvimento. Assim nem só os extremófilos podem ser importantes como modelos terrestres de seres de outros planetas mas também tudo o que os rodeia. De facto, há locais à superfície da Terra que se pensa serem parecidos com ambientes fora da Terra no Sistema Solar. Vejamos alguns.

1.2.2.1. Vales secos da Antártida

Antártida - água a rodos no estado sólido - temperaturas extremamente baixas. É o local mais frio da Terra mas que também contém alguns dos seus locais mais secos. O ar frígido dos ventos que sopram nos vales deste continente contém pouca humidade mas, ao subir, ainda fica mais seco. Esses ventos, extremamente dessecantes, criam enormes zonas de rocha livres de gelo. A precipitação é inferior a

5 mm/ano e esta magra quantidade permanece gelada a maior parte do tempo, inacessível à vida. Durante o inverno desolador, a temperatura cai abaixo dos -40°C , mas sobe para uns “agradáveis” 1°C no verão que só dura 15 dias. A temperatura mínima até agora medida foi de $-89,2^{\circ}\text{C}$. Qualquer animal que fique encalhado nestes vales morre instantaneamente congelado. Algumas focas foram encontradas, preservadas há milhares de anos (Dartnell, 2007, p.37-39).

Quando Robert Scott explorou em 1903 este continente, designou esses vales por “vales da morte”. De facto não conseguia observar qualquer sinal de vida. No entanto, também aqui há vida. Um olhar mais próximo, permite observar populações minúsculas de nemátodos e tardígrados alimentando-se de bactérias e detritos, descongelados por um breve verão. Estes organismos não rastejam em terreno aberto mas vivem em pequenas fendas existentes entre os grãos de rocha espalhados por esta desolação. Ecossistemas inteiros estão escondidos no interior das rochas, concedendo-lhe o seu nome: criptoendólitos.

A vida só é possível porque estas fendas criam um microclima muito mais agradável que o ar frio fora delas. Uma espécie de efeito de estufa minúsculo. O escasso calor do Sol aquece as rochas e as fendas aprisionam o gelo derretido e protegem os seus habitantes do brutal vento gélido. Além disso, neste continente o índice de UV é dos mais altos, (em parte devido ao buraco na camada de ozono) o que inibe a clorofila e danifica proteínas e DNA. Ora, estando enterrados a poucos milímetros dentro da rocha, a maior parte dos UV são bloqueados mas suficiente radiação visível é captada permitindo a fotossíntese para líquenes e bactérias que sustentam estes ecossistemas miniatura. A rocha transparente funciona assim como um filtro físico muito eficaz.

Pensam alguns que esses habitats endolíticos podem existir na superfície de Marte. Aí, a temperatura ambiente, mesmo no equador, é extremamente baixa na maior parte do ano, mas as rachaduras em rochas podem absorver suficiente calor para recolher poças de água do degelo e suportar vida por pequenos períodos durante o verão marciano. Marte, sem uma atmosfera espessa ou um escudo de ozono, está totalmente desprotegido da radiação UV - o efeito destruidor do DNA é cerca de 400 vezes maior em Marte do que na Terra. A absorção dos raios UV por uma camada fina de rocha translúcida pode proporcionar efeitos filtradores semelhantes aos existentes nos vales secos terrestres e assim permitir a continuação da fotossíntese.

Contudo há enormes problemas que a vida em Marte também enfrenta: primeiro, não é possível a existência de água líquida nas condições atmosféricas atuais existentes no planeta - Marte faz os vales secos terrestres parecerem húmidos e quentes;

segundo, supõe-se que as radiações UV tornaram o solo de Marte muito oxidante, rasgando quaisquer moléculas orgânicas que se possam ter acumulado. Mas estas condições poderiam não ter sido sempre assim tão desfavoráveis no passado.

Há um mecanismo para criar fendas nas rochas que se pensa estar espalhado pelo sistema solar e pela galáxia. Os impactos dos meteoritos e dos cometas que normalmente são agentes de destruição também geram imensas ondas de choque que fraturam as rochas que estão próximas, abrindo um enorme número de potenciais habitats endolíticos. Um exemplo pode ser dado aqui na Terra. A cratera Haughton situa-se na inabitada ilha de Devon no norte do Canadá. Esta gigantesca cova tem um diâmetro de 24 km e foi escavada há cerca de 20 milhões de anos atrás por um impacto de um meteorito com 2 km de diâmetro numa zona onde existiam naquela altura florestas e agora se encontra sepultada debaixo de uma espessa camada de gelo. Um anel de rochas vulcânicas de choque, à volta da cratera é cerca de 24 vezes mais porosa que as rochas em quaisquer outros lugares. Essas fendas estão habitadas por organismos fotossintéticos que se desenvolvem poucos meses por ano no interior dos seus clementes microambientes. Ora, a superfície de Marte está cheia destes escombros partidos de impactos e portanto a sua superfície não tem falta de habitats endolíticos semelhantes. Igualmente importante é a possibilidade das primeiras células a colonizar as massas terrestres terem feito uso destas oportunidades primordiais. De facto, a taxa de impactos durante o sistema solar primitivo era centenas de vezes maior do que atualmente e as rochas dos primeiros continentes deveriam estar extensamente fraturadas.

Há um outro habitat resultante de impactos meteoríticos que pode revelar-se de imenso interesse astrobiológico em ambientes gelados. É que um impacto não cria só uma vasta área de rochas de choque mas também um imenso ponto focal de calor, proveniente da energia do impacto e da crosta profunda e quente trazida para a superfície, fundindo o gelo à volta e formando um lago geotérmico. Bactérias provenientes de baixo ou então, trazidas pelo vento, rapidamente colonizaram estes oásis de água quente numa terra de permafrost. Por exemplo o impacto que originou a cratera Haughton, também originou uma poça de água com temperaturas superiores a 50 °C durante muitos milhares de anos. No fim do bombardeamento pesado tardio, os impactos maiores teriam criado lagos hidrotermais que persistiram durante muitos milhões de anos, tempos significativo em termos de evolução de vida. A água do lago infiltrou-se na quente crosta situada abaixo e de volta escoou uma mistura rica em minerais dissolvidos que poderiam suportar colónias de quimioautotróficos (tal como nas fontes hidrotermais). Ao longo do tempo o calor armazenado escapou

gradualmente e o lago gelou por fora, mas a água por baixo desta capa isoladora permaneceu líquida por muito mais tempo. O potencial para a vida diminuiu à medida que o gradiente de energia de que dependia se dissipou até o ecossistema colapsar.

O hemisfério sul de Marte está fortemente craterizado e pensa-se que contém uma grande quantidade de água no subsolo. Assim, esses sistemas hidrotermais poderiam ser extremamente importantes para a astrobiologia no planeta vermelho primordial, tanto no aparecimento de vida como no fornecimento de novos nichos para subsequente colonização. De facto, já foram avistadas crateras nas zonas polares de Marte que contém lagos de água gelada. Mas ainda não se sabe se esses lagos terão sido geotérmicos algumas vezes, mas a possibilidade é excitante. À medida que a água arrefeceu poderia ter preservado células no seu interior. A esperança é que no futuro se possam desenterrar amostras desse gelo e derretê-lo numa tentativa de fazer reviver os organismos aí presos.

1.2.2.2. Fontes hidrotermais

Quando a Voyager se encontrava numa das luas de Júpiter, nos anos 70 do século passado a descobrir vulcões em erupção, algo de extraordinário se estava também a descobrir nas profundidades negras dos oceanos da Terra, também em algo em erupção quase ou mesmo permanente - vida abundante em fontes hidrotermais.

No fundo dos mares a profundidades de vários quilómetros, a luz do Sol não chega lá mas existem comunidades vivas de barófilos, que lidam com as pressões esmagadoras da ordem das centenas de vezes a pressão à superfície do mar. Mesmo na Fossa das Marianas no ponto mais baixo da crosta terrestre a cerca de 11 mil metros de profundidade com pressões mais de mil vezes a atmosférica ao nível do mar, se encontram organismos vivos. Mesmo que a fotossíntese seja impossível nestas muito escuras profundidades, os animais sentem-se em casa nessas planícies abissais subsistindo graças aos detritos orgânicos que caem vindos de cima. Grandes rebanhos de pepinos do mar são observados ocasionalmente a atravessar o chão dos oceanos, agitando nuvens de sedimento tal como as debandadas de gnus ou búfalos nas savanas levantavam nuvens de pó. Contudo, a comida é escassa a estas profundidades, o que, aliado às baixas temperaturas resulta em populações escassas de animais e taxas de crescimento baixas. Ora, pensava-se que isto era verdade para todo o oceano até se descobrirem, em 1977, as fontes hidrotermais.

Mas estas fontes revelaram coisas ainda mais surpreendentes. Descobriram-se camarões com órgãos sensíveis à luz nas suas costas. Ora, o que é que estes animais podem estar a ver? É que a luz do Sol não consegue penetrar a estas profundidades.

A explicação mais provável é serem esses camarões sensíveis à débil luz emitida pela água superaquecida das fontes para, deste modo, evitarem ser escaldados. Mas há outra possibilidade. A das suas células poderem fotossintetizar usando esta débil luz. E mesmo em 2005, foram encontradas bactérias fotossintéticas em amostras colhidas nas águas destas fontes. Mas ainda falta a prova definitiva. Apesar de tudo, se se provar que existem organismos que sobrevivem apenas com base na luz geotérmica abre-se uma fonte completamente inesperada de energia para a astrobiologia.

Fontes semelhantes também foram encontradas nos cumes espalhados pelos fundos dos mares, embora só os do Pacífico acolham moluscos e vermes gigantes. Cada fonte tem uma composição química particular, temperatura particular e velocidade de fluxo. Algumas misturam-se suavemente com as águas do mar próximas, não se formando plumas de precipitação (Dartnell, 2007, p.40-43).

Em termos de possibilidades para a astrobiologia, as fontes hidrotermais podem representar um modo de vida quase universal. Os organismos termofílicos autotróficos podem suportar um ecossistema inteiro de bactérias e animais, em reações redox inorgânicas, muito longe da luz do Sol. Contudo mesmo esta forma de vida depende indiretamente da fotossíntese, pois muito do poder oxidante dissolvido das águas do mar provém de plantas das águas de cima iluminadas pelo Sol.

A vida nas fumarolas negras pode funcionar inteiramente em oxidantes abióticos, como, aliás, se acredita ter acontecido com as primeiras células, mas a pouca energia disponível limitou severamente o tamanho do ecossistema. Qualquer planeta ou lua com um oceano de água e fonte interna de calor pode fornecer um tal habitat com ecossistemas subterrâneos na interface entre uma crosta quente reduzida e uma água fria oxidada. É que se pode passar com Europa, a lua gelada de Júpiter.

1.2.2.3. Aquíferos basálticos profundos

As fontes hidrotermais são parcialmente suportadas pela fotossíntese mas há alguns exemplos de vida completamente isolada da luz do Sol e autossuficiente em energia e substâncias orgânicas. Estes ecossistemas, alimentados pelos químioautotróficos, fornecem o melhor modelo possível de vida na Terra para a vida em toda a parte.

Um exemplo disto acontece nas rochas basálticas ricas em ferro redutor que reage lentamente com a água de aquíferos para libertar hidrogénio gasoso. Archaea químioautotróficos vivendo a um quilómetro no seu interior obtém toda a sua energia oxidando este hidrogénio passando o eletrão libertado para dissolver o CO₂ e deste modo fixá-lo. Os produtos desta reação redox são água e metano o que permite chamar **metanogénicos** a estes organismos. Estes metanogéneos anaeróbios e os autotróficos que se alimentam deles acredita-se que são completamente

independentes do oxigénio ou moléculas orgânicas produzidas pela fotossíntese acima e deste modo, são designados por ecossistemas microbianos litotróficos subterrâneos (SLiMEs). Uma vantagem para estas comunidades é de que não necessitam de pontos quentes de calor geotérmico ativo tais como as fumarolas negras, apenas rocha vulcânica redutora (Dartnell, 2007, p. 44-47).

Há no entanto uma questão que se põe: até que profundidade a vida se pode encontrar na crosta terrestre? Quilómetros abaixo, ainda há poros minúsculos e fraturas dentro da rocha, preenchidos com água e suficientemente amplos para as bactérias. No fundo de furos efetuados na Suécia, a 5,3 km de profundidade, onde a temperatura atinge 70°C, foram encontradas grandes variedades de bactérias heterotróficas. Parece não haver limites de profundidade para a sobrevivência, desde que a temperatura ambiente não seja letal. A temperatura mais alta a ser suportada por um organismo termófilo é de 121 °C. Este ponto pode ser encontrado a várias profundidades dependendo da espessura local da crosta mas pode ser tão grande como 10 km nalgumas formações rochosas sedimentares.

As células de um SLiME têm um crescimento extremamente lento e baixas densidades populacionais, nalguns locais apenas alguns milhares de células por grama de sedimento, cerca de 1 milionésima parte de um solo superficial fértil. No entanto considerando o vasto volume da camada superior da crosta terrestre, isto pode constituir uma impressionante massa de material vivo. A “biosfera quente profunda” está estimada por alguns pesquisadores a exceder a soma da massa total da vida superficial. Em muitos aspetos estas fissuras subterrâneas são habitats ideais - o seu ambiente imutável fornece um fluxo de energia química estacionário ainda que ligeiramente limitado, sem UV ou radiação cósmica energética e as células estão protegidas de todas as catástrofes devastadoras que aconteçam acima. A biosfera quente profunda está até protegida de um impacto ou glaciação devastadores.

Rocha basáltica, água e dióxido de carbono dissolvido supõe-se que sejam materiais comuns em quaisquer planetas terrestres ou luas onde haja vulcanismo e assim muitos acreditam ser o modelo do SLiME um método infalível de suportar vida extraterrestre. Supõe-se existirem estas condições no subsolo de Marte. A camada superficial da rocha marciana tem sido fortemente quebrada por impactos: o seu subsolo acredita-se estar carregado com poros preenchidos com gelo. Este permafrost deverá derreter à volta dos pontos quentes geotérmicos e reagir com a rocha basáltica. Ora, na Terra, archaea que metabolizam o hidrogénio libertam metano: plumas de metano intrigantes tem sido recentemente descobertas em Marte. Poderá isto ser a assinatura de uma camada profunda de SLiME no planeta vermelho?

1.2.2.4. O lago Vostok e outros lugares

Na Terra há mais casos que podem ser parecidos com o que se passa em Europa. É o caso do lago Vostok: tem uma forma elíptica com 250 km de comprimento e 50 km de largura cobrindo uma área de 10400 km². O seu fundo é irregular. Calcula-se que o lago contenha um volume de 5.400 km³ de água doce. Está totalmente protegido da atmosfera e outros contactos com o exterior por uma espessura de 4 km de gelo. Pensa-se ter sido formado há cerca de 15 milhões de anos, logo poderá ter formas de vida microscópica que evoluíram de modo diferente das existentes à superfície. Para já sabe-se que essas águas tem 50 vezes mais oxigénio que as águas dos lagos normais. Apesar de haver cientistas que afirmam não haver vida em condições tão oxidantes outros afirmam precisamente o contrário. De facto, a não haver vida seria o primeiro corpo de água dela desprovida na Terra.

Também há grutas (por exemplo, Cueva de VilaLuz, onde vivem micróbios que se alimentam de compostos de enxofre - oxidam o H₂S) (Lemonick, 2014, p. 2-21). Mas poderá até haver mais comunidades de outros tipos de micróbios. Ora isto poderá também acontecer nas cavernas de Marte que já foram descobertas nesse planeta.

1.2.2.5. Vida nas nuvens

Também em plena atmosfera têm sido encontrados organismos, nas partículas suspensas que se pensava serem constituídas apenas por pó, água gelada e sais.

De facto, num desses estudos (DeLeon-Rodriguez et al., 2013, p. 2575-2580) verificou-se que, cerca de 20% de todas as partículas a flutuar na camada atmosférica situada entre 8 e 15 km acima da superfície da Terra, eram organismos vivos. As bactérias vivas descobertas tinham diâmetros que variavam entre 0,25 e 1 µm. Além disso havia alguns fungos. Dependendo do local de proveniência das massas de ar, as bactérias eram de origem marinha ou terrestre.

Isto tem profundas implicações para o nosso entendimento do estado do tempo, a propagação das doenças e a vida noutros planetas. Na ausência de pó e de outros materiais que possam fornecer bons núcleos de condensação para a formação do gelo, esta pode ser facilitada se houver um pequeno número destes microrganismos nestas altitudes a atrair humidade que se encontra nas vizinhanças. Se tiverem o tamanho correto para a formação de gelo, podem afetar as nuvens à sua volta. Por sua vez os furacões podem desempenhar um papel importante na propagação destes microrganismos, movendo grandes quantidade de bactérias a longas distâncias.

Acredita-se que estas bactérias e fungos se possam alimentar de compostos de carbono flutuando no ar, mas não há certezas. Poderá até haver vida ativa e crescimento nas nuvens.

Quererá isto dizer que outras bactérias poderão flutuar na atmosfera de outros planetas? É mais uma hipótese e mais um novo local que vale a pena explorar.

E se formos mais para cima, para o espaço exterior? Se for possível haver condições para a vida aí se preservar uma nova questão se põe: poderá a vida passar de uns planetas para outros?

1.2.3. PANSPERMIA

A teoria da panspermia, significando literalmente “sementes em todo o lado” não é nova. Fred Hoyle e Chandra Wickramasinghe argumentaram que o espaço interplanetário e os cometas estão povoados de bactérias, algas e vírus. De facto há muitas semelhanças entre os espectros produzidos pelos microrganismos e os espectros das poeiras interestelares (Fernandez, 2005, p. 331). No entanto, pode haver uma explicação não biológica para estes factos. Também se discutiu amplamente nos anos 90 a possibilidade de células microscópicas resistentes tais como esporos de bactérias, poderem ser espalhados pela galáxia impulsionados pela pressão de radiação da sua estrela. Mas acabou por cair no esquecimento pois é pouco provável que células desprotegidas possam sobreviver aos Ganos de tempo necessários para viajar entre estrelas. Mas a noção de que as células poderiam ser transportadas entre planetas e luas incluídas em meteoritos, ressuscitou a teoria.

Há três obstáculos que as bactérias deverão ultrapassar para sobreviver a uma viagem entre dois planetas: ejeção do seu mundo-original num bocado de rocha; exposição ao ambiente hostil do espaço durante a travessia; reentrada na atmosfera e impacto na superfície do planeta de destino. Ora, cálculos e experiências feitas em cada uma destas etapas demonstram não haver problemas de maior a vencer (Clancy, Brack & Horneck, 2005, p. 90-112).

Inicialmente pensava-se ser impossível que as células sobrevivessem se fossem lançadas de um planeta. Só com um impacto mesmo muito energético seria possível ejetar fragmentos da superfície atingida com velocidade suficiente para perfurar a atmosfera, escapar à gravidade e entrar no espaço interplanetário. Mas um tal impacto criaria uma enorme quantidade de calor no solo, evaporando num instante qualquer água e enviaria um enorme pulso ondulatório de pressão através das rochas sólidas, misturando e esmagando a vida próxima. Bastaria só a enorme aceleração sofrida pelos fragmentos ao serem ejetados para longe para destruir completamente

quaisquer células. Ora, verifica-se que isto é verdade para o solo imediato da zona do impacto mas análises matemáticas permitiram “descobrir” uma interessante zona próxima, a **zona de fragmentação** (Dartnell, 2007, p. 47-52). A onda de pressão que se propagar na crosta para baixo é refletida de volta à superfície onde encontra uma onda mais direta movendo-se para os lados, afastada do local de impacto. As duas fundem-se. Em certas zonas ocorre interferência destrutiva, anulando muita da intensa pressão. É o que se passa quando se atira com uma pedra para um lago. Numas zonas, duas cristas coincidem e combinam-se, mas noutras, uma crista e um vale anulam-se. Dentro da zona de fragmentação, pedaços de rocha são ejetados para cima sem terem sofrido grandes choques. Este processo é particularmente eficiente se o corpo impactante atingir o chão num ângulo de incidência grande e rasante - muita da rocha acima do choque explode para o exterior relativamente ilesa mas um simples impacto pode arremessar milhões de toneladas de rocha superficial para o espaço. A onda de calor é muito breve. Logo não tem tempo suficiente para penetrar muito no interior dos pedregulhos pelo que as bactérias isoladas no centro se salvam de serem cozidas. Há 2 provas concretas disto tudo: muitos pedaços de rocha marciana são encontrados na Terra, ejetados precisamente por este processo e analisados em laboratório demonstraram terem sido sujeitos a picos de pressão relativamente baixos e os seus interiores não aquecidos acima de 100 °C. Em experiências laboratoriais, grânulos porosos de cerâmica são preenchidos com bactérias e atirados a um alvo duro a velocidades de cerca de 20 mil km/h. Como resultado, entre uma bactéria em cada dez mil a cada milhão recuperam e continuam a crescer, apesar de terem sido sujeitas a forças de desaceleração enormes.

Assim que chegam ao espaço surgem outros problemas. Trata-se de um ambiente muito hostil: um vácuo quase perfeito, banhado por radiação. Ora, a “ausência de peso” não tem parecido ser um problema maior para o funcionamento de uma célula e muitos organismos conseguem sobreviver no frio extremo sem danos. Só a radiação parece ser o maior fator limitante: os UV podem matar uma célula desprotegida em minutos, um perigo intensificado pelo efeito extremamente dessecante do vácuo. Contudo, um filtro de alguns mm de rocha é uma proteção suficiente, tal como acontece com os endólitos da Antártida. Mas a radiação de fundo de partículas altamente energéticas que surgem dos flares solares e supernovas é um problema muito maior e só dentro de um meteorito com vários metros de espessura de rocha sólida poderão as bactérias ter completa proteção.

Ora estas partículas energéticas podem degradar progressivamente as moléculas numa célula, impondo um tempo limite, para o meteorito fazer a sua aterragem noutra

planeta antes que todas as células sejam mortas. A extrema dessecação do espaço vai causar danos nas estruturas moleculares. Os constituintes dentro da célula deverão reagir entre si, em reações semelhantes às de um bife a grelhar. Já houve testes com células vivas lançadas em órbita e expostas ao ambiente espacial. Tiveram morte quase instantânea mas quantidades apreciáveis sobreviveram numa missão espacial de seis anos com proteção mínima mesmo que só a oferecida pelas poucas camadas de células mortas situadas por cima.

Para haver longas permanências de vida no espaço surge o problema da hibernação. Para se transferir entre Marte e a Terra um meteorito precisará tipicamente de 15 milhões de anos para que a sua órbita gradualmente se modifique até atravessar a da Terra. As simulações mostram que é possível uma pequena quantidade de rochas serem ejetadas numa trajetória muito mais direta, sendo lançadas em “primeira classe”, em apenas alguns milhares de anos mas, em geral, para a panspermia ser plausível é necessário que as bactérias sobrevivam no espaço por muitos milénios.

Ora, manterem-se dormentes é algo em que as bactérias são especialistas. Muitas delas, tais como aquelas comuns no solo, formam esporos resistentes a situações de muito frio ou seca ou falta de comida. Esta cápsula dessecada está protegida por um invólucro exterior duro e o DNA no seu interior está estabilizado por proteínas especiais. Alguns esporos são muito resistentes a ataques ambientais, tais como os causados pela radiação, vácuo, temperaturas extremas e substâncias químicas perigosas e simplesmente despertam logo que as suas vizinhanças se tornem novamente favoráveis. Muitos procariontes e alguns eucariontes, tal como o tardígrado, podem esperar longos períodos de tempo num estado dormente, no qual o metabolismo e crescimento estão parados. Mas há casos espantosos de tempos de dormência: esporos secos presentes nas tumbas egípcias conseguiram-se reavivar passados 3500 anos; psicrofílos depois de terem sido congelados em gelo cerca de 500 mil anos; bactérias presentes em âmbar há 40 milhões de anos. Possivelmente, os dormentes mais duráveis de todos, são um grupo de halófilos isolados de um grande depósito de sal profundo no Mar do Norte. Ora, estes foram criados por um lago que evaporou quando a Europa se encontrava no equador. As bactérias foram extraídas do antigo fluído preso dentro dos cristais e observados a reanimar-se. Ora, se as células são tão antigas como a rocha, um tema muito debatido, então estiveram dormentes durante 250 milhões de anos. Se células ou esporos dormentes enterrados no interior de um pedaço de rocha de tamanho razoável conseguem sobreviver porque não o farão no espaço?

O obstáculo final é a chegada. Em muitos aspetos, os riscos de chegar a salvo espelham os da partida. Se o planeta tem uma atmosfera espessa, a superfície da rocha cadente será substancialmente aquecida pela fricção com o ar, produzindo uma estrela cadente. Mas as rochas maiores que já escudaram da radiação a sua carga de células também a pode proteger das altas temperaturas nos poucos segundos da reentrada. As bactérias ficam bem isoladas no interior de um meteorito mesmo que o seu exterior fique fundido numa crosta carbonizada.

Na queda há uma forte desaceleração que envia uma onda de choque que atravessa o meteorito assim que ele atinge o solo. Se a queda se dá na água ou no gelo a fração de células que sobrevivem é maior. Pequenos grãos de rocha oferecem um limitado abrigo a longo prazo da radiação mas, por outro lado, podem cair pela atmosfera abaixo com aquecimento pouco significativo e aterrar suavemente no solo.

Cálculos demonstram que a permuta de rochas entre planetas é, na verdade, muito comum. Por exemplo, desde a formação do sistema solar mais de um bilião de fragmentos de dimensões inferiores a alguns metros foram ejetados de Marte sem excessivo calor ou choque. E cerca de 5% chegaram à Terra num intervalo de tempo inferior a 8 milhões de anos. Cerca de 40 destes viajantes interplanetários foram encontrados: um deles é o famoso ALH84001. O “tráfego” inverso, Terra-Marte, tem sido cerca de cem vezes menor, devido à maior força da gravidade do nosso planeta. Se a vida surgiu muito cedo no sistema solar em Marte e talvez Vénus assim como na Terra, teria havido uma movimentada fertilização cruzada de células assim que os planetas interiores foram atingidos com elevadas taxas de impactos. A taxa de sobrevivência das bactérias no interior de meteoritos que aterram no gelo em vez de rocha é muito maior, de modo que, vale a pena considerar a colonização das luas geladas dos gigantes gasosos - embora arremessar uma rocha para tão longe como o sistema solar exterior seja complicado; permutar vida nessa direção é cerca de um milhão de vezes menos provável.

Todas as três etapas da panspermia - ejeção, transferência e chegada - oferecem taxas muito baixas de sobrevivência para os organismos a bordo de um meteorito. Cada um destes tem uma probabilidade de um em cem milhões de terminar a viagem vivo, probabilidades mais próprias de lotarias. Mas qualquer pedaço de rocha ejetada do seu mundo original abriga biliões e biliões de “bilhetes para este sorteio”. Células litiautotróficas foram encontradas a viver nos poros das rochas basálticas profundas com densidades da ordem centenas de milhões por quilograma e a abundância de esporos na rocha superficial é ainda milhares de vezes maior. Mesmo um pequeno bocado da crosta terrestre lançada no espaço estará literalmente cheia de vida. E

basta apenas uma simples bactéria sobreviver na viagem interplanetária para os seus descendentes poderem infetar um mundo inteiramente virgem.

Em 2001, Ben Clarck, deduziu uma fórmula para calcular a probabilidade de uma transferência viável de vida no interior do sistema solar por **lito-panspermia** que incluía as incertezas relacionadas com as várias fases dessa transferência

$$P_{AB} = P_{biz} \times P_{ee} \times P_{sl} \times P_{ss} \times P_{se} \times P_{si} \times P_{rel} \times P_{st} \times P_{sp} \times P_{efg} \times P_{sc}$$

onde P_{AB} é a probabilidade de uma lito-panspermia bem sucedida e é o produto de outras probabilidades tais que,

P_{biz} - probabilidade do projétil atingir uma zona biologicamente habitada

P_{ee} - probabilidade de uma rocha de uma zona biologicamente habitada ser ejetada até uma órbita de escape

P_{sl} - probabilidade de um organismo ejetado com o projétil sobreviver ao lançamento

P_{ss} - probabilidade de um organismo dentro do ejeta sobreviver no espaço

P_{se} - probabilidade de um organismo dentro do ejeta sobreviver à entrada na atmosfera do planeta alvo

P_{si} - probabilidade de um organismo dentro do ejeta sobreviver à colisão na superfície do planeta alvo

P_{rel} - probabilidade do organismo ser libertado do meteorito

P_{st} - probabilidade do ambiente no planeta alvo não ser tóxico para o organismo

P_{sp} - probabilidade do organismo sobreviver a potenciais predadores na biosfera alvo

P_{efg} - probabilidade do ambiente ser favorável ao crescimento e desenvolvimento do organismo;

P_{sc} - probabilidade do organismo e seus descendentes competirem com sucesso na biosfera alvo

Atualmente só se conhece a Terra como planeta habitado, logo P_{biz} e P_{ee} tem de tomar em consideração esta situação. Mais de 2000 crateras de tamanhos maiores que 20 km tem sido arrancados da superfície da Terra nos últimos 4 Ganos, causando a ejeção de um trilião de fragmentos da zona de fragmentação. As três primeiras probabilidades estão relacionadas com a ejeção, a quarta, com a transferência e as restantes com a chegada destes “passageiros liliputianos” ao planeta-alvo. Para achar P_{AB} , só falta efetuar experiências com microrganismos terrestres para avaliar as quatro últimas probabilidades.

1.2.3 As assinaturas da vida

A vida na ou perto da superfície de um planeta quase certamente vai interagir com o solo, rochas, oceanos e atmosfera com a qual contacta. Ora, sabemos que a vida cria ordem no ambiente à sua volta, logo age como uma força motriz para um grande número de transformações químicas globais. Por exemplo, na Terra a vida induz anomalias químicas como o excesso de O_2 atmosférico, criado na fotossíntese, e a libertação de grandes quantidades de H_2S efetuada por bactérias redutoras de sulfato nos oceanos. Além disso, a persistência de misturas de gases metastáveis, tais como o O_2 , N_2 e CH_4 na atmosfera, e por exemplo, de desequilíbrios isotópicos (e.g. entre oxigénio ligado à água da hidrosfera e O_2 atmosférico), são acionados pelos efeitos da biosfera no seu ambiente (Clancy, Brack & Horneck, 2005, p. 113).

Portanto essas anomalias visíveis dentro da atmosfera e dos oceanos de um planeta podem, ser tomadas como uma evidência a priori da presença de vida, tal como foi proposto pelo cientista britânico, James Lovelock, nos anos 1960. Aplicando essas ideias à biosfera da Terra levou Lovelock a formular a **hipótese Gaia**, em que a biosfera como um todo é considerada como uma entidade viva. Ora, aplicando este critério na composição atual da atmosfera marciana levou o cientista americano Tobias Owen e outros a concluir que há pouca, ou nenhuma, indicação de atividade biológica contemporânea em Marte.

A observação de uma quantidade grande de O_2 , na atmosfera de um planeta, por si só não é um bom indicador de vida (Dartnell, 2007, p. 166-169). Há muitos processos inorgânicos que produzem este gás. Por exemplo, os raios UV podem decompor as moléculas de água originando este gás, como se supõe ter acontecido no passado em Vénus. No entanto, altos níveis de oxigénio quando combinados com a presença de gases redutores, já pode ser considerado uma boa assinatura. De facto, como estes vão ser destruídos por oxidação, é necessário estarem sempre a ser criados. Por exemplo, o CH_4 , é rapidamente oxidado a CO_2 e água; para manter os seus níveis muito longe do equilíbrio químico é necessário serem produzidos mais de 1 Gton deste gás por ano.

Assim, se a análise espectroscópica mostrar uma atmosfera muito longe do equilíbrio químico, por exemplo, uma contendo altos níveis de O_2 e CH_4 , há uma boa razão para suspeitar de vida. O vapor de água, CO_2 e CH_4 dão bons sinais em espectroscopia de IV; de facto a excelente absorção nos IV é a verdadeira razão por que são tão bons gases de estufa. Quanto ao oxigénio, não dá bom sinal IV, mas a luz UV converte-o em ozono que já absorve bem nesta zona do espetro.

No entanto, a ausência de um desequilíbrio não é necessariamente evidência contra a presença de vida. Embora os ecossistemas superficiais globalmente distribuídos deixem a sua assinatura na atmosfera de um planeta, as de vida menos globalmente distribuída poderão permanecer indetetáveis. Em Marte, possíveis organismos poderão ter-se enfiado em refúgios isolados profundamente debaixo do solo. Ainda que vestígios de metano tenham sido detetados em Marte, um tal sinal será indetetável em exoplanetas. Mesmo na Terra, foi necessário cerca de 1 Ganos de fotossíntese para que o oxigénio pudesse ser detetável.

Ora estas bioassinaturas já foram vistas na atmosfera do nosso planeta. A sonda Galileo, em 1990, impulsionada em direção de Júpiter voltou as suas câmaras para trás e mediu o espectro da luz refletida pela Terra detetando a presença de oxigénio e metano em extremo desequilíbrio químico. Além disso também detetou a impressão digital da clorofila, a molécula que captura a luz durante a fotossíntese. A conclusão não necessita de ser dita por ser tão óbvia.

As plantas terrestres absorvem luz visível apenas até certa frequência e refletem toda a radiação IV para evitar o sobreaquecimento. Num espectro eletromagnético, a vegetação causa um salto repentino na absorvância na zona dos IV, designada por “*red cliff*”. Ora a frequência deste salto repentino depende da estrutura celular da vegetação; nem todas as plantas terrestres o produzem na mesma frequência. Já se pensou em utilizar este “*red cliff*” para detetar a molécula da clorofila em exoplanetas. Mas nem todos concordam. No entanto, uma bioassinatura mais universal para a vegetação seria a observação de qualquer tipo de salto espectral, cuja intensidade aumentasse ou diminuísse consoante as estações do ano desse planeta.

Mas há mais bioassinaturas possíveis. A deteção só de um dos enantiómeros pode ser um sinal de vida. Além disso, nos casos dos isótopos de carbono ou nitrogénio ou hidrogénio, a vida prefere usar o isótopo mais leve (Clancy, Brack & Horneck, 2005, p. 119-120). Este último caso já foi utilizado como prova das primeiras formas de vida na Terra surgirem há cerca de 3,8 Ganos quando foi encontrada em bocados de grafite contidos em rochas na Gronelândia uma razão carbono-12 para carbono-13 mais rica no isótopo de carbono-12.

2. A VIDA NO SISTEMA SOLAR

2.1 REQUISITOS CÓSMICOS

2.1.1 Um mundo adequado

Para a água se manter líquida à superfície de um planeta são necessárias pressões e temperatura adequadas. É o que se pode deduzir do diagrama p-T da água (figura 5). Assim seguindo a linha a tracejado na pressão de 1 atm verifica-se que a água é líquida entre os valores já familiares de 0 °C a 100 °C. Mas subindo a pressão, tal como nos fundos dos oceanos, a água continua líquida mesmo a temperaturas acima de 300 °C. Por outro lado, descendo abaixo do ponto triplo (temperatura e pressão às quais as três fases - sólida, líquida e gasosa - coexistem) então a água só pode existir no estado sólido ou gasoso. Esta é a presente situação em Marte.

Mas a temperatura superficial depende da distância a que um planeta se encontra da sua estrela-mãe. Demasiado perto, a água evapora, demasiado longe a água congela. Ora, esta zona de distâncias, com a forma de um anel que permite a existência de água líquida chama-se zona habitável (HZ). Voltaremos a ela mais tarde.

A existência de uma atmosfera desempenha um papel fundamental na regulação da temperatura e pressão superficiais.

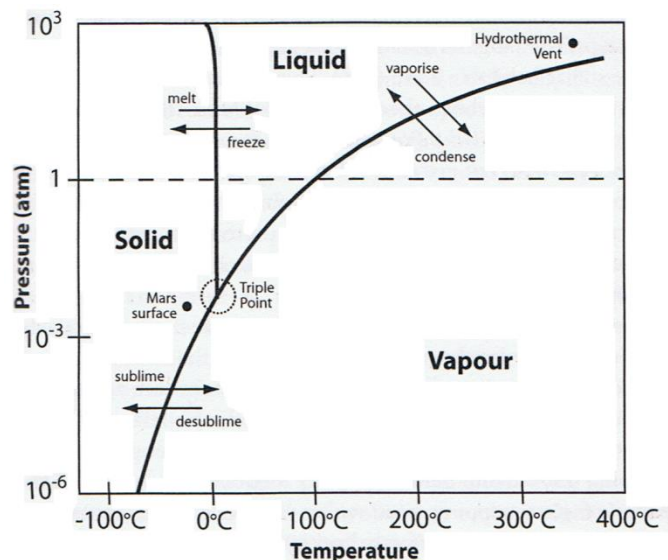


Fig. 5 Diagrama de fases da água mostrando a zona de temperaturas e pressões entre as quais a água é líquida. Abaixo do ponto triplo a água sublima (tirado do livro, "Life in Universe" de Lewis Dartnell e parcialmente modificado em paint)

A atmosfera da Terra isola muito bem a sua superfície. O vapor de água, CO₂ e CH₄ existentes no ar atuam como gases de estufa e deixam passar as radiações visíveis que atingem a superfície e esta, por sua vez, emite infravermelhos, ou radiação térmica. Mas estes gases absorvem uma grande quantidade desses infravermelhos aprisionando o calor em baixo o que faz subir as temperaturas. É semelhante ao que os painéis de vidro fazem num jardim de estufa: deixam passar a luz visível mas não deixam sair tanto os infravermelhos pelo que o ar dentro aquece permitindo a criação

de alimentos de zonas mais quentes e mais protegidos. De facto, o efeito de estufa é uma parte do sistema planetário perfeitamente saudável: a temperatura média na Terra é cerca de 33 °C superior ao que seria se não existisse atmosfera. Esta dá-nos proteção para que a vida se desenvolva com segurança. É pena que o Homem esteja atualmente a aumentar os níveis de CO₂ de tal modo que o equilíbrio climático esteja em risco (Dartnell, 2007, p.60-62).

2.1.2 O ciclo carbonato-silicato e a tectónica de placas.

O dióxido de carbono não está estático, circulando entre as rochas a água e o ar formando um ciclo - **ciclo carbonato-silicato**.

Dissolvido na água, o CO₂ forma um ácido fraco, ácido carbónico, H₂CO₃, que dissolve as rochas de silicatos formando o CaCO₃, ou calcário. Esta rocha deposita-se no fundo dos oceanos, bloqueando efetivamente o carbono. Se nada mais acontecesse todo o CO₂ seria retirado da atmosfera em poucas centenas de milhões de anos. Desaparecendo o CO₂ o mundo congelaria. Mas a **tectónica de placas** fecha este ciclo.

Na Terra, a nova crosta produzida nos cumes dos oceanos migra lentamente para o exterior, acumulando espessas camadas de sedimentos contendo carbono. A crosta oceânica é puxada implacavelmente em direção às zonas de subdução, onde é forçada a ir para baixo, fundindo no quente manto interior. O CO₂ volta outra vez para a atmosfera libertado em vulcões. A maior parte da crosta completa o ciclo em cerca de 150 milhões de anos, reciclando constantemente o CO₂ para o ar.

Ora este ciclo é autorregulável. A velocidade de dissolução das rochas silicatadas para formar calcário depende da temperatura. A maiores temperaturas, o CO₂ é removido mais depressa da atmosfera, reduzindo o efeito de estufa. Num clima frio, a reação diminui e o CO₂ acumula-se, aumentando a temperatura. Este feedback negativo mantém automaticamente os níveis de CO₂ no ponto certo: assim, o planeta inteiro tem um “termostato” que regula cuidadosamente o clima global. Os oceanos são não só vitais providenciando um ambiente para a vida mas a água também desempenha um papel crucial controlando a temperatura, erodindo as rochas de silicatos e lubrificando os movimentos das placas tectónicas umas sobre as outras.

É devido à tectónica de placas, até agora a única comprovada no sistema solar, (há já quem afirme existir também em Europa) e talvez, extremamente rara no Universo, que há cadeias de montanhas, oceanos e vida. E dentro desta última, a de maior complexidade, a vida animal. Além de permitir o funcionamento do ciclo carbonato-silicato, criou os continentes da Terra e tornou possível a existência do seu campo

magnético, o seu mais potente meio de defesa. Acresce ainda que promove a biodiversidade, a maior defesa contra as extinções em massa (Ward & Brownlee, 2003, p. 202-212) .

De facto, se não houvesse tectónica de placas, a Terra permaneceria, como nos primeiros 1,5 Ganos da sua existência um mundo de água, com apenas algumas ilhas a pontilhar a sua superfície. O que poderia levar, com o passar do tempo, à perda dessa mesma água, e a acontecer isso, vir a assemelhar-se a Vénus. Na ausência de campo magnético a Terra e a sua carga de vida ficariam sujeitas ao bombardeamento potencialmente letal de radiações cósmicas e a pulverização pelo vento solar levaria lentamente a atmosfera para o espaço tal como aconteceu com Marte.

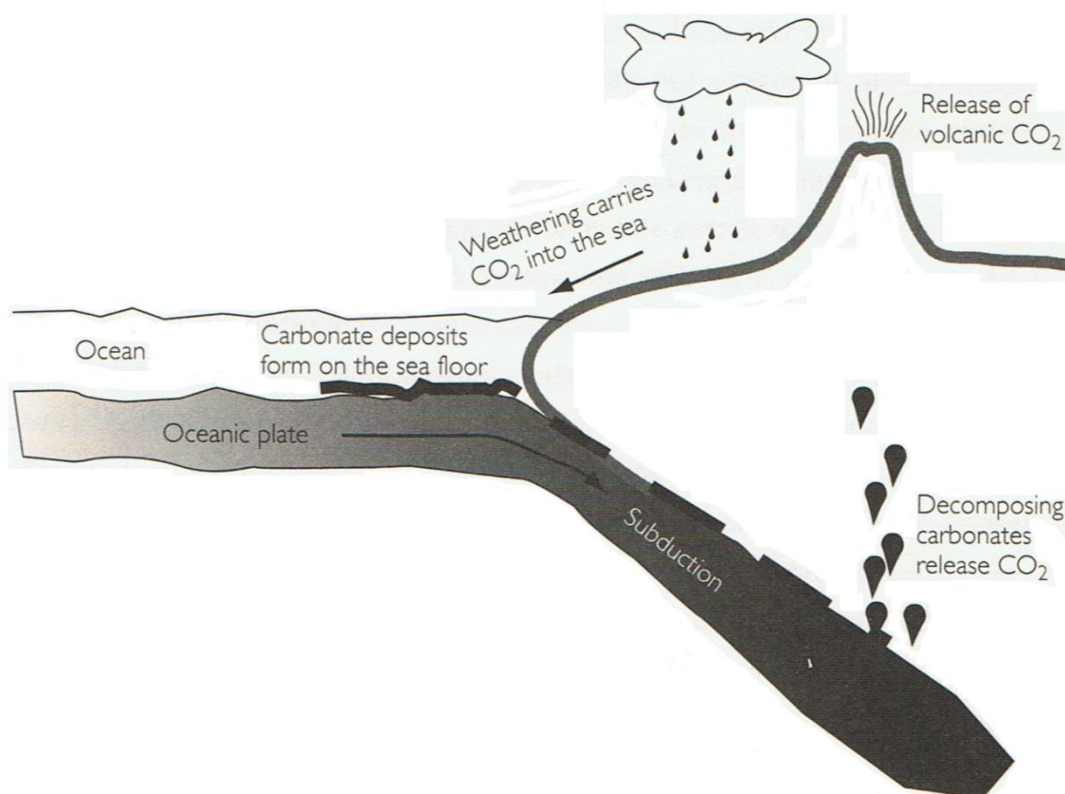


Fig. 6 - O ciclo carbonato-silicato. Este ciclo notável tem controlado a quantidade de dióxido de carbono atmosférico, um gás de estufa, para regular a temperatura de superfície durante Ganos. Porque este processo necessita de água superficial e de tectónica de placas, não se conhece mais nenhuma ocorrência em qualquer parte. Fonte: *Rare Earth*, Peter D. Ward and Donald Brownlee, 2003, p. 211

2.1.3. Nem anã nem gigante

Como só conhecemos o sistema solar com suficiente detalhe, não podemos concluir se a Terra é demasiado grande ou se é apenas uma coincidência cósmica para permitir o aparecimento de vida. Contudo, há boas razões para pensar que a vida requer um planeta aproximadamente do tamanho do nosso.

Um planeta que seja muito mais pequeno que o nosso terá uma força da gravidade demasiado débil para agarrar uma atmosfera espessa para os eons de tempo necessários para a vida se desenvolver. Uma atmosfera delgada apenas proporcionará um aquecimento por efeito de estufa limitado e uma pressão de ar mais baixa diminuirá a zona de temperaturas entre as quais a água se poderá manter líquida. Deste modo, um pequeno mundo enfrentará dificuldades em sustentar condições líquidas durante o tempo suficiente para a vida evoluir. Além disso, pequenos planetas também perdem o seu calor mais rapidamente. O núcleo da Terra continua muito quente desde a sua formação e o manto acima é suficientemente fluído para permitir as correntes de convecção que comandam a tectónica de placas. Esta energia geotérmica assegura que a Terra continua a ser muito ativa vulcanicamente e haja tectónica de placas.

Há outra importante função do quente interior da Terra: o ferro no interior do seu núcleo induz um potente campo magnético. Este campo de forças atinge o topo da atmosfera e seguramente deflete o vento solar, um vasto fluxo de partículas fluindo da superfície do Sol. Nos planetas sem este casulo protetor, o vento solar lenta mas constantemente sopra para longe a atmosfera. Acredita-se que Marte terá perdido um grande volume dos seus gases originais e água para o espaço em parte porque o seu campo magnético falhou quase imediatamente depois da sua formação. Deste modo, por diversas razões, planetas com uma atmosfera mais fina e um interior mais frio deverão ser muito mais vulneráveis à ameaça de uma glaciação descontrolada.

Planetas muito pequenos não deverão ser quentes durante um tempo suficiente para criarem um interior diferenciado. Logo, os isótopos dos elementos radioativos de urânio, tório e potássio não se iriam concentrar no núcleo, logo o seu calor dissipar-se-ia ainda mais rapidamente para o espaço. Assim não haveria atividade geotérmica por longos períodos de tempo, a impulsionar a tectónica de placas e vulcanismo.

Numa Terra anã haveria muitos problemas para a vida se desenvolver. A sua menor gravidade e a crosta mais espessa e rígida permitiriam altas montanhas mas a perda de atmosfera e água significaria condições superficiais frias e mares rasos. O destino mais provável para um tal mundo seria uma glaciação descontrolada.

Uma Terra gigante encontraria dois problemas principais. Primeiro, o interior seria mais quente, logo haveria uma maior atividade vulcânica, com um contínuo vomitar de gases de estufa para a atmosfera, causando temperaturas de superfície mais elevadas. Segundo, o planeta poderia ser levado a ter problemas sérios na sua própria geografia. Um interior muito quente cria uma crosta mais delgada, mais maleável que, combinada com uma gravidade mais forte, originaria uma superfície relativamente mais suave com pouco relevo. A maior gravidade (e provavelmente um campo

magnético mais intenso) significaria uma atmosfera mais espessa, mais quente, com menores perdas de atmosfera e água. Estas condições favoreceriam um oceano muito profundo e mais planetário, com pouca, senão mesmo, nenhuma terra seca. A falta de rocha exposta significaria uma baixa taxa de erosão dos silicatos. O ciclo carbonato-silicato seria quebrado e sem um efetivo mecanismo para remover o excesso de dióxido de carbono da atmosfera, os seus níveis subiriam inexoravelmente. Assim, um grande planeta terrestre parece fornecer as condições perfeitas para um efeito de estufa descontrolado, em última análise, fervendo os oceanos e esterilizando da face do planeta qualquer vida que pudesse ter surgido.

Os nossos dois planetas vizinhos, Vénus e Marte, ilustram perfeitamente este ponto. Vénus que tem um pesado cobertor atmosférico de dióxido de carbono é muito quente e a superfície está completamente seca. É um caso claro de efeito de estufa descontrolado. Marte é muito frio, com uma atmosfera fina e um caso claro de glaciação descontrolada.

Intrigantemente se as suas posições tivessem sido trocadas no nascimento do sistema solar, com Marte mais próximo do Sol e Vénus mais longe do que a Terra o seu desenvolvimento teria acabado de modo muito diferente. Marte, apesar da sua atmosfera delgada e vulcanismo reduzido, poderia ter ficado suficientemente quente para reter mares na sua superfície e Vénus talvez nunca se teria desviado do limiar que levou o seu efeito de estufa a ficar fora de controlo. Em vez de um, o sistema solar poderia ter uma família de três planetas habitáveis.

2.1.4. Efeitos de estufa e glaciares descontrolados

Se o planeta é muito quente, grandes quantidades de vapor de água, que é gás de estufa, acumulam-se no ar. E não estando esse vapor controlado por feedback negativo o planeta fica cada vez mais quente. E o oceano ferve enchendo a atmosfera de vapor. Então, sem o efeito lubrificante da água a tectónica de placas termina e as rochas carbonatadas expostas na superfície decompõem-se ao calor libertando CO₂. Mas, UV provenientes da estrela foto-dissociam, a grandes altitudes, as moléculas da água formando-se, H₂, que escapa para o espaço. Logo a água do planeta é perdida para sempre bem como o seu potencial para a vida se desenvolver. Isto é um efeito de estufa descontrolado

Se um planeta está ligeiramente mais afastado da sua estrela, mesmo uma atmosfera espessa pode não assegurar calor suficiente. Logo os oceanos começam a gelar, criando vastas áreas brancas na superfície do planeta que refletem eficientemente a maior parte do calor da estrela. A temperatura global cai; e até o CO₂ começa a

solidificar, saindo da atmosfera. Então com este gás de estufa depositado no solo, o efeito desaparece. É uma glaciação descontrolada.

2.1.5 A Lua

A Terra teve outro capricho que se pode provar ter sido importante para a sobrevivência da vida, em particular a vida multicelular animal: a maior lua de todos os planetas interiores. Mercúrio e Vénus não têm luas e os dois companheiros de Marte, Phobos e Deimos, não são consideradas verdadeiras luas mas asteroides capturados. A Lua estabiliza a rotação da Terra, devido à sua gravidade. O eixo de rotação tem uma inclinação de $23^{\circ} 27'$ em relação ao plano orbital da Terra mas esta é afetada pelos puxões gravitacionais do Sol e dos planetas Júpiter e Saturno. Estando a Lua, muito mais próxima domina essas influências e mantém essa inclinação estável (Encrenaz et al., 2003, p. 21 ver fig.1.7).

Há evidências de que, no passado, Marte, que agora tem uma inclinação do seu eixo muito semelhante à da Terra, inclinou mais de 60° . Sem a Lua, a inclinação da Terra balançaria caoticamente: pelos cálculos essa inclinação poder-se-ia aproximar de 85° . Sabemos pouco acerca dos efeitos que essa modificação teria. Simulações computacionais do clima sem a influência da lua têm sido efetuadas e nelas a Terra tombaria até o seu eixo ficar quase horizontal. Ao fim de um ano, os polos receberiam mais luz que o equador, e as condições climáticas entre estas duas regiões ficariam trocadas. Não está claro se um planeta oscilante seria significativamente mais propenso a processos climáticos descontrolados. A vida complexa terrestre seria provavelmente impossível mas quanto à vida subterrânea profunda não sabemos.

2.1.6. O protetor Júpiter

Tem-se afirmado que a presença de um grande planeta gigante gasoso no sistema solar exterior é essencial para a vida evoluir num planeta rochoso.

Põe-se a hipótese da influência gravitacional de um gigante gasoso afastar cometas perdidos, atraindo-os até eles próprios serem atingidos (em 1994 o cometa Shoemaker-Levy 9 colidiu com Júpiter) ou desviando-os para fora do sistema solar. Deste modo, Júpiter poderá ser uma espécie de guarda-redes celestial, protegendo os planetas interiores de possíveis impactos devastadores. Estima-se que, sem o efeito protetor de Júpiter, 200 vezes mais cometas teriam caído em direção à Terra.

No entanto esta presumível necessidade não é tão convincente como outras.

Os impactos cometários não são sempre inteiramente maus. Se não tivesse acontecido o fim abrupto do reino dos dinossauros, os nossos antecessores mamíferos de pequeno tamanho nunca teriam tido a oportunidade evolucionária para

se espalhar e produzir a nossa espécie consciente e tecnologicamente apta. Além do mais, a vida teria sido impossível se não tivesse acontecido o bombardeamento brutal na infância do nosso planeta que lhe entregou não apenas os oceanos mas também as moléculas orgânicas construídas na nebulosa.

Também tem sido defendido que Júpiter interrompeu o crescimento do sistema solar interior e, tivesse não existido, tanto a cintura de asteroides como Marte teriam formado planetas maiores do que a Terra. Um Marte mais massivo teria podido ter uma atmosfera mais espessa e uma superfície mais quente e assim teria podido manter-se habitável. Em contrapartida, há quem pense que a perturbação gravitacional de um grande planeta gasoso é essencial para acelerar a formação dos planetas interiores a partir da colisão dos embriões rochosos.

2.1.7. Assassinos do espaço sideral

O maior dos perigos para a vida no Sistema Solar ou em qualquer outro local, surge a partir das *supernovas*. As suas explosões são tão energéticas que vão destruir tudo o que se encontre relativamente perto, esterilizando toda a vida até 1 ano-luz de distância. Ora, quanto mais afastada da Terra menor é o efeito da explosão mas tanto mais provável é de acontecer. O pico máximo de perigo surge aos 30 anos-luz. E este provém da enorme enxurrada das partículas altamente energéticas emitidas. Este tipo de radiação até já se encontra espalhado pela galáxia e as células da Terra já desenvolveram mecanismos para reparar os danos causados por ela. Mas só para níveis baixos. Assim podem provocar mutações muito rápidas nos organismos diretamente expostos à superfície e destruir a camada de ozono durante séculos. Então a radiação UV pode atingir livremente a superfície destruindo toda a maquinaria da fotossíntese e, por arrasto, todos os ecossistemas dela dependentes. Mas os efeitos a longo prazo são menos previsíveis: poderá, por um lado, aumentar a formação das nuvens, que refletem mais a luz do Sol desencadeando uma glaciação descontrolada mas, por outro lado, a queda da fotossíntese e menor remoção de CO₂ da atmosfera, poderá aumentar a temperatura global.

Individualmente, só as estrelas com massas 10 ou mais vezes maiores que a massa do sol, logo muito raras, dão origem a supernovas. No entanto, também ocorrem supernovas do tipo II, em binários de estrelas, podendo uma delas ser anã branca e a outra uma estrela normal à qual é roubada matéria até haver uma explosão na anã branca. A probabilidade de acontecer uma explosão deste tipo é, apesar de tudo, mínima. Desde que apareceu a complexa vida animal na Terra - cerca de 0,6 Ganos atrás - pensa-se que, pelo menos uma das cinco grandes extinções em massa

ocorridas, poderá ter sido desencadeada por uma supernova (Ellis & Schramm, 1994, p. 235-238). No entanto, será pouco provável alguma vez encontrar a “prova do crime” pois os restos dessa supernova já se moveram tanto que poderão estar agora do lado mais longínquo da galáxia. Também se descobriu uma camada de um isótopo pesado de ferro na crusta funda do oceano, que evidencia ter ocorrido uma supernova próxima da Terra nos últimos milhões de anos. A explosão deu-se a cerca de 100 anos-luz sendo ainda possível observar os restos a afastar-se nas nossas vizinhanças.

Mas há perigos bem mais próximos de nós. Na sua órbita à volta do Sol, os asteroides colidem muitas vezes uns com os outros, dando origem a corpos de menores dimensões, que são designados por meteoroides. Ora, um asteroide tem dimensões de algumas centenas de metros para cima enquanto os meteoroides tem dimensões compreendidas entre as de um grão de areia e alguns metros de diâmetro. A colisão de pequenos meteoroides com a Terra ocorre todos os dias, e quase todas as semanas um grande meteoróide com alguns metros de diâmetro embate no nosso planeta. No entanto a atmosfera da Terra protege-nos muito bem destes pequenos perigos. Quando um pequeno meteoróide entra na atmosfera, a interação deste com as camadas superiores faz com este se desintegre numa bola de fogo antes de atingir a superfície - são os meteoros ou estrelas cadentes. Ocasionalmente, o meteoróide sobrevive a essa entrada e atinge o solo - é um meteorito. Ora há vários testemunhos de estragos causados por meteoritos. Por exemplo, um meteorito de 12 kg atingiu a um automóvel em Peekskill a 9 de Outubro de 1992 causando estragos na sua bagageira. Mas existem inúmeros meteoritos espalhados pelo globo e o maior deste objetos já encontrado pesa 60 ton.

Existem asteroides e cometas de curto período (período orbital inferior a 200 anos) que podem causar grandes estragos. Ora, estes têm órbitas que periodicamente os trazem para perto da Terra, favorecendo uma eventual colisão com esta. As órbitas de alguns destes corpos designados por *Near-Earth Objects* (NEO) chegam mesmo a interseccionar a órbita da Terra e nesse caso são designados por *Earth Crossing Objects* (ECO). Estima-se que existam mais de 1 milhão de asteroides pertencentes ao grupo dos NEO com mais de 40 m de diâmetro e cerca de 1100 com mais de 1 km tendo os maiores um diâmetro inferior a 25 km. Os cometas de curto período perfazem apenas uma pequena percentagem dos NEO, fazendo com que a probabilidade de uma colisão seja baixa. Isto deve-se ao facto de estes corpos passarem a maior parte do seu tempo de vida a grandes distâncias do Sol e da Terra.

2.2. A CONSTRUÇÃO DE UMA TERRA HABITÁVEL

2.2.1. O Sistema Solar

O Sistema Solar é constituído pelo Sol e todos os objetos submetidos ao seu campo de gravitação (Encrenaz, 2003, p.1). Considerando efeitos como o vento solar e a pressão de radiação ou a interação com o vento solar o sistema solar só termina a cerca de 2 anos-luz em todas as direções do Sol (cerca de 126 mil UA). Isto é cerca de metade da distância da estrela mais próxima, Próxima de Centauro (a 4,3 anos-luz). No entanto, ainda se conhece mal a maior parte desta enorme região: os objetos mais distantes que nós conhecemos são os cometas e pensa-se serem provenientes de uma distância que não excederá as 50 mil UA; por vezes, um destes cometas ou outros corpos podem ser perturbados por forças gravitacionais exercidas por outras estrelas e esse corpo ou cometa é desviado para o interior do sistema solar. A nave espacial que mais se afastou da Terra, Voyager 1, ainda só se distanciou cerca de 1 a 2 centenas de UA; a imensa maioria dos outros objetos que nós conhecemos encontra-se até poucas centenas de UA.

Assim temos o Sol, oito planetas e 5 planetas anões com os seus satélites (ou luas) e pequenos corpos (SSSBs) que incluem milhares de asteroides, cintura de Kuiper e nuvem de Oort.

Espacialmente os planetas situam-se a distâncias de 0,4 UA a cerca de 30 UA do Sol, os asteroides concentram-se entre Marte e Júpiter (1,7 UA até 5,1 UA), a cintura de Kuiper de 30 a 50 UA, a heliosfera estende-se até 230 UA e a Nuvem de Oort pensa-se que chegue até 50 mil UA do Sol (quase 1 a.l.).

Em termos de massa, quase toda a matéria está concentrada no Sol (99,7 %) e a restante na sua maior parte em Júpiter (cerca de 0,3 %).

Há quatro planetas telúricos ou rochosos que estão mais próximos do Sol, com superfícies sólidas de dimensões pequenas e densos, constituídos por materiais pesados (metais e rochas). Os outros quatro estão mais afastados e designam-se por planetas jovianos ou jupiterianos: são gigantes e pouco densos constituídos por hidrogénio, hélio e materiais voláteis (Sá, 2005, p. 57).

Sabemos que o sistema solar se encontra numa galáxia - Via Láctea - que por sua vez faz parte de um grupo de galáxias - Grupo Local - por sua vez integrado num superenxame - Superenxame Local ou Superenxame da Virgem. E este juntamente com um infindável número de outros superenxames e outras estruturas - matéria escura e energia escura - formam todo o Universo conhecido.

2.2.2. A criação dos elementos

Qualquer projeto de construção requer que os materiais adequados estejam no local próprio antes de iniciada a construção. A formação da Terra não foi diferente. A primeira etapa foi então a reunião das matérias-primas. E estas foram os elementos.

Tudo se iniciou com o Big-Bang, o verdadeiro “começo do tempo”. Nascido num instante o Universo começou por ser extremamente quente e denso, mas a expansão subsequente levou rapidamente a um arrefecimento e a ambientes mais rarefeitos.

Durante a primeira meia hora foram criados os núcleos dos átomos que, ainda hoje, constituem a maior parte dos blocos construtores de estrelas: hidrogénio e hélio, cerca de 99% da matéria “normal” (visível) do universo. E assim terminou a designada núcleo-síntese primordial. Ora, por si só, o Big Bang, não criou grande diversidade química. Apenas deu os três primeiros elementos à Tabela Periódica.

Ora, a temperatura, depois da primeira meia hora situava-se abaixo dos 50×10^6 °C. Assim, já era demasiado baixa para que o hélio se transformasse em carbono (no mínimo são necessários 100×10^6 °C). E as colisões entre os núcleos de hidrogénio já eram relativamente pouco frequentes pois a densidade já era baixa de mais, logo as velocidades das reações nucleares também.

Passados cerca de 300 mil anos o espaço tornou-se transparente. A temperatura de cerca de 3000 K os eletrões já puderam ser agarrados pelos núcleos formando-se os primeiros átomos. Os fótons já se podem deslocar a longas distâncias (radiação cósmica de fundo).

Nesses primórdios, o Universo distribuía a sua massa visível por finos “farrapos” de matéria enfiados em grandes espaços vazios e escuros (Dartnell, 2007, p. 53-57). Com a passagem do tempo, essas espécies de “teias de aranha cósmicas” colapsaram em longas cadeias de galáxias. Dentro destas, vastas nuvens de gás colapsaram, tornando-se cada vez mais quentes até as reações de fusão nuclear entrarem em ação, inundando o Universo com as primeiras luzes desde a sua criação. Ou seja, surgiram as primeiras estrelas. O universo teria nessa altura cerca de 300×10^6 de anos de idade.

O calor e pressão, imensas existentes nos núcleos destas primeiras estrelas obrigam os núcleos atômicos a unirem-se. O processo, fusão nuclear, liberta enormes quantidades de energia e é o que permite que uma estrela brilhe.

Os núcleos de hidrogénio (simples protões) são consumidos primeiro, fundindo uns nos outros para produzir núcleos de hélio, com dois protões. Ora esta etapa da fusão nuclear prossegue até o hidrogénio do núcleo se esgotar. Nesta altura, há um núcleo de hélio, rodeado por uma camada de hidrogénio que continua a fundir. O grande peso

da estrela acima do núcleo não é mais equilibrado pela força de pressão contrária criada pela fusão logo o núcleo é cada vez mais comprimido criando ainda maiores temperaturas e pressões. Então o núcleo encolhe, mas a camada exterior da atmosfera da estrela incha, produzindo uma estrela enorme - gigante vermelha - muitas centenas de vezes maior que o nosso sol e relativamente fria na superfície. Mas no núcleo as temperaturas atingem cerca de 100×10^6 K. Então o hélio começa a fundir. Três núcleos de hélio-4 fundem-se para formar carbono, processo designado por triplo-alfa. A adição de outro núcleo de hélio-4 transforma carbono em oxigénio.

Este processo merece mais uma explicação. A adição do terceiro núcleo é potenciada pelo facto da energia da reacção ser quase exactamente igual à energia de um estado excitado de carbono. Este fenómeno é conhecido como *ressonância* o que implica que o carbono é produzido muito mais depressa por fusão nuclear do que por outro processo qualquer. A ocorrência desta correspondência em níveis de energia é apenas uma coincidência cósmica - se algumas das constantes da física fossem só mesmo um bocadinho

diferentes, as estrelas não fundiriam para formar carbono. De certo modo, parece que o Universo foi feito por medida, com certos fatores finamente ajustados para permitir a produção de carbono e, conseqüentemente, vida. Se o Universo tivesse sido criado com regras um pouco diferentes, talvez não fosse possível a síntese do carbono, logo a nossa vida seria impossível.

A fusão do hélio no núcleo das estrelas não dura muito. E a fusão termina assim que todo o hélio é consumido. Nesta altura, a estrela tem uma estrutura parecida com a de uma cebola:

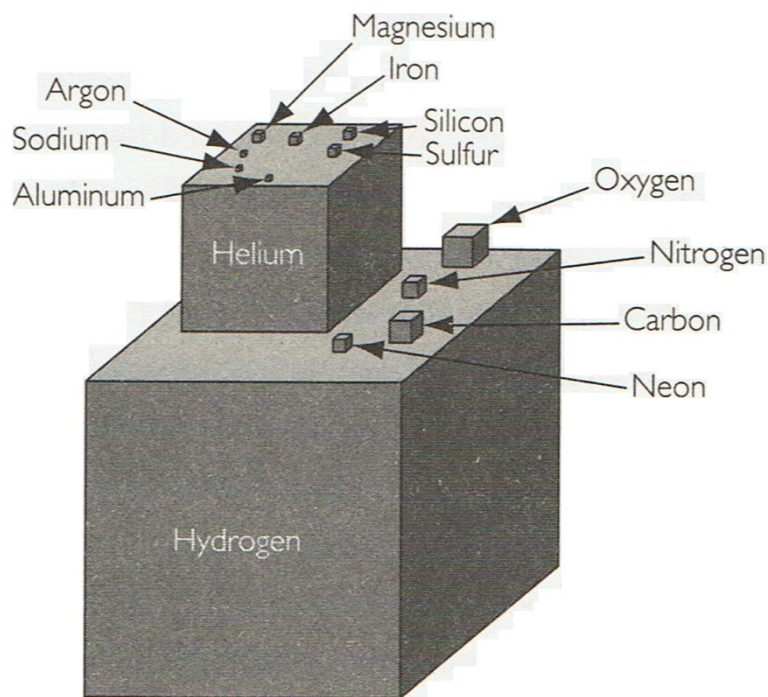


Fig. 7 As proporções relativas em número dos elementos mais abundantes no Sol- O hidrogénio e o hélio e os elementos que se situam diretamente em cima do cubo de hidrogénio dominam a composição as estrelas e dos planetas jovianos. Os planetas terrestres não podem incorporar eficientemente estes elementos e são constituídos grandemente de oxigénio e dos elementos que se situam acima do cubo de hálío. Fonte: *Rare Earth*, Peter D. Ward and Donald Brownlee, 2003 - pp 41

um núcleo de carbono e oxigénio está rodeado por uma camada de hélio e esta por uma camada exterior de hidrogénio. Se a massa não for muito grande forma-se uma nebulosa planetária com uma anã branca no centro. Se for muito grande, o que é relativamente menos frequente, não se fica por aqui. A gigante passa a supergigante vermelha, e os núcleos são ainda mais comprimidos ocorrendo uma novas rondas de fusões nucleares obtendo-se o silício, enxofre e outros até ao ferro. Mas o ferro tem o núcleo mais estável de todos. O peso massivo das camadas externas vai continuar a esmagar o núcleo mas neste já não é possível criar a força de pressão contrária. O colapso vai ser rapidíssimo e as camadas exteriores vão ser violentamente atiradas para o espaço numa colossal explosão de **supernova**. Por um pequeno período de tempo, a estrela brilha mais do que toda a galáxia. Este evento é tão energético que uma ronda final de fusão ocorre, formando-se os elementos mais pesados do Universo. E as camadas exteriores são atiradas para o espaço, espalhando elementos pesados biologicamente essenciais pelo Cosmos.

E com as poeiras constroem-se os planetas. E as poeiras são formadas com base nos elementos a seguir ao hélio. E dentro destas, o carbono é o elemento decisivo (Ward & Brownlee, 2004, p. 39-43). Ora, a formação do carbono teve de esperar pela criação das gigantes vermelhas. Como as estrelas só se transformam em gigantes vermelhas nos últimos 10% dos seus tempos de vida e como só 6% de estrelas que se criaram é que podem passar por esta fase então durante muito tempo não foi possível haver planetas terrestres nem vida. Só com 2×10^9 anos de idade é que se acumulou poeira suficiente no Universo para se formarem planetas terrestres.

Os telescópios, essas “máquinas do tempo”, talvez nos permitam um dia observar uma zona morta no Universo, a partir de uma certa distância, logo a partir de um certo instante, em que não havia vida nem planetas nem os elementos para os produzir.

O resultado da nucleossíntese estelar pode ser expressa na abundância cósmica dos elementos mas que, afinal, se baseia nas composições da atmosfera do Sol e do sistema solar. O que sobressai é que tudo continua a ser H e He. Estando a quantidade total dos outros elementos fixada em cerca de 2%. A seguir temos o O, C, N e Ne com percentagens em massa superiores a 0,1% em massa e com o Fe, Si, Mg e S, com percentagens entre 0,01% e 0,1% (ver fig. 7).

O H depressa se combinou com O para formar água nas nuvens intermoleculares na razão de um para dois. Ou seja, podemos considerar que as primeiras estrelas gradualmente molharam a galáxia. Com os elementos Fe, Mg, Si e O, fez-se a estrutura da Terra. O Th, U e K fornecem calor radioativo ao seu interior e ao interior de todos os corpos rochosos. Os elementos, C, N, O, H, P e S são os elementos

biogénicos mais importantes pois proporcionam a estrutura e a química complexa da vida e são designados abreviadamente por **CHNOPS**. Mas há outros que também são importantes em pequenas quantidades tais como o sódio, o iodo e muitos metais.

Assim, cada um dos átomos existentes na Terra e nas suas criaturas - incluindo nós - já esteve no interior de, pelo menos algumas estrelas. E sabe-se também que uma pequena proporção dos átomos de hidrogénio que fazem parte dos nossos corpos também não se originou nesta galáxia; a violência pura das explosões de supernovas garante que algum material é ejetado para fora da sua galáxia-mãe. O hidrogénio das camadas exteriores das estrelas que explodiram na galáxia de Andrómeda, nossa vizinha, foi captada pela Via Láctea e incorporada nas suas nebulosas. Podemos até afirmar que somos filhos das estrelas mas também, parcialmente, seres intergalácticos.

É interessante saber que influência teria uma composição diferente de elementos na vida da Terra? Ora a abundância dos elementos pesados influencia a massa e tamanho dos planetas terrestres. Com uma menor abundância de elementos pesados não haveria tanto material sólido para crescer, logo a Terra seria menor. Isto aconteceria se o Sol fosse mais velho, ou tivesse mais longe do centro da galáxia.

2.2.3. O nascimento de um sistema planetário

Dentro das nuvens de gases e poeiras espalhadas pelo Universo há duas forças opostas a atuar e que se equilibram: a da gravidade que tende a comprimi-las e a da pressão térmica que tende a expandi-las (Alves, 2010, p.15-18). Por vezes esse equilíbrio é perturbado por uma explosão de supernova próxima ou até pela passagem de uma outra nuvem próxima ou estrela ou outra razão qualquer.

Então a onda de choque resultante quebra o equilíbrio e a nebulosa começa a contrair-se sob a ação da sua própria gravidade. Mas isto só aconteceu porque essa nebulosa era relativamente densa e fria (≈ 10 K) e deveria estar animada de um movimento inicial qualquer para que a contração gravitacional fosse acelerada num movimento de rotação. Ou seja era um exemplo de **nuvem molecular**.

Ao contrair-se, a temperatura aumenta o que faz aumentar a pressão térmica que tenta impedir essa contração. Ora, se a massa for superior a um determinado valor - massa de Jeans - a força da gravidade é sempre maior que a força de expansão térmica. Logo, continua a contrair-se e cada vez mais rápido e se antes já tinha uma rotação muito lenta, vai rodar cada vez mais depressa para conservar o momento angular, tal como uma patinadora gira mais depressa à medida que encolhe os braços.

E vai acabar por se fragmentar. No entanto cada um dos fragmentos, desde que tenha massa e densidade suficientes, individualiza-se e, por sua vez, roda e contrai-se mais, evoluindo para um sistema estelar individual ou múltiplo. Foi de um desses tipos de fragmentos - a nebulosa solar - que há cerca de 4568 milhões de anos) se formou o nosso sistema solar.

Assim, a contração da nebulosa solar deixou para trás um disco achatado com a matéria concentrada no plano equatorial - disco de acreção - a rodar à volta de um núcleo central que continua a encolher a aquecer cada vez mais e a acumular cada vez mais matéria. O que se passou é semelhante ao achatamento em forma de disco que um pedaço de massa sofre nas mãos de um padeiro, ao preparar uma pizza fazendo-a girar em torno de um dedo. E o aquecimento dá-se porque a energia gravitacional se está a transformar em energia térmica.

Ora, a massa total do disco é apenas um centésimo da massa do Sol e estende-se dez vezes mais para lá da órbita atual de Plutão. Mas a composição do disco não difere da do núcleo central nem da existente no início nem até mesmo da do Sol atual.

A 1500 K as poeiras evaporam-se, a 2000 K todo o hidrogénio molecular dissocia-se. A partir de um certo valor, a zona central torna-se opaca e a radiação tem dificuldade em sair: a contração é abrandada. Estamos perante o **proto-Sol** que se torna visível para qualquer observador situado num sistema estelar próximo a temperaturas entre 2000 a 3000 K. Mas nos polos do proto-Sol surge entretanto um fluxo bipolar de partículas que retira parte da matéria à nuvem. Este transporta parte do momento angular para o exterior, permitindo estabilizar todo o sistema.

No disco, a distâncias de 300 a 500 milhões de quilómetros do proto-Sol, as temperaturas seriam ainda da ordem dos 2000 K pelo que quaisquer elementos estariam no estado gasoso. Mas a um certo ponto, a condensação fez com que a nebulosa ficasse transparente, começando a arrefecer. Isto veio a permitir que se produzissem compostos, inicialmente sob a forma de grãos de poeira. Um dos primeiros a formar-se teria sido o corindo, o óxido de alumínio que compõe as safiras e os rubis, aos 1760 K, e os últimos os gelos de metano e de azoto, a 70 K, nos bordos mais frios da nebulosa solar. Quanto mais próximo do centro mais depressa se dá a condensação. E é esta diferença na condensação que vai refletir na diferenciação composicional e não só dos planetas interiores dos planetas exteriores. É o fator determinante como se verá a seguir. O termo condensação que está consagrado pelo uso, não está correto pois o que se passou foi uma sublimação já que para as pressões tão baixas existentes no espaço não há substâncias no estado líquido.

À medida que se vão formando as partículas de poeira vão-se estabilizando em órbitas médias no plano médio da nebulosa, no que virá a ser o plano da eclíptica atual. Os choques aleatórios entre partículas rodopiantes e a atração gravitacional entre elas juntam-nas umas às outras, formando-se agregados que crescem cada vez mais, dependendo a rapidez e o tamanho com que isso acontece da distância ao proto-Sol. Deste modo, estima-se em 2 mil anos o tempo necessário para acretar grãos com 1 cm de diâmetro a 1 UA do Sol e em 50 mil anos para acretar grãos com 0,3 mm na órbita atual de Neptuno. Assim que se tornam grandes o suficiente para exercer uma apreciável força gravitacional, o seu crescimento aumenta rapidamente, os maiores cada vez maiores à medida que puxam mais e mais material. De facto, a acreção é um processo acelerado; por isso, entre 10 mil a 100 mil anos já haveria corpos de 1 até 10 Km de diâmetro - **planetesimais** - em órbitas da ordem de 1 UA: os embriões dos planetas do Sistema Solar interior.

Entretanto o proto-Sol continua a contrair-se. Está agora na fase de estrela T-Tauri: talvez com o dobro da massa atual, a uma luminosidade maior que a de hoje. Estabelece-se um vento estelar fortíssimo constituído por jatos de partículas expulso da Estrela: o vento T-Tauri. Ora, esse vento empurra para o espaço os restos da nebulosa solar, impedindo que Júpiter capture mais gás e se torne numa estrela. E o caminho fica livre para a sua luz ser observável de longe. Nasce uma estrela. Mas o processo não acaba nesta fase que dura centenas de milhares de anos para uma estrela como o Sol. A partir de agora já não há mais matéria a cair na estrela e ela só vai encolher mas mais lentamente. Assim, a energia potencial gravítica transforma-se em energia cinética e energia radiante em partes iguais (Sá, 2004, p.159-160). Entretanto, a temperatura no interior aumenta cada vez mais. Quando, no núcleo da estrela, se atingem 10^7 °C, são despoletadas as reações nucleares que transformam o hidrogénio em hélio, libertando-se tanta energia que vai obrigar a contração a parar finalmente. Passaram-se dezenas de milhões de anos até se atingir esta situação estável que se prevê se vai manter durante cerca de 10^{10} anos.

Entretanto no disco a acreção forma centenas de embriões planetários com tamanhos entre o da Lua e de Marte. As interações gravitacionais entre os corpos presentes no enxame de corpos orbitantes, por vezes atiram um corpo em direção do Sol ou ejetam-no para fora do sistema solar. Os embriões colidem ocasionalmente, construindo os planetas rochosos interiores que conhecemos hoje (Dartnell, 2007, p. 78-80). E cada planeta acaba por limpar a maior parte da massa existente na sua zona de alimentação - uma secção da nebulosa solar com forma de anel que se estende grosseiramente até metade das distâncias dos planetas vizinhos. E assim há várias

zonas anelares concêntricas cada uma com um planeta a formar-se. Estima-se que tudo isto se passou em cerca de 10^7 anos.

Contudo, os planetas terrestres estão quase desprovidos de carbono ou água. Porque se formam na zona interior da nebulosa solar, dentro da chamada “linha de neve”, há demasiado calor para que as substâncias voláteis tais como o H_2 , CO , N_2 e água se incorporem nos grãos de poeiras a crescer. A Terra ficou apenas com quantidades vestigiais destes componentes quando comparado com os corpos que se formaram mais afastados do proto-Sol. Por exemplo, os meteoritos carbonáceos, que se pensa serem amostras de asteroides típicos formados entre Marte e Júpiter contêm água até 20% (em minerais hidratados semelhantes ao talco) e carbono até 4%. A Terra, em comparação tem só 0,1% de água e 0,5 % de carbono.

Se a Terra se tivesse formado a partir de materiais semelhantes aqueles existentes na cintura de asteroides referidos atrás longe do Sol (Ward & Brownlee, 2004, p.47), os seus oceanos teriam centenas de quilómetros de profundidade e o seu conteúdo em carbono seria maior em várias ordens de grandeza. Assim, resultaria um planeta totalmente coberto por água e com enormes quantidades de CO_2 na sua atmosfera. Haveria um aquecimento resultante do efeito de estufa com temperaturas à superfície de centenas de $^{\circ}C$ semelhantes às existentes na superfície de Vénus. Nesta situação nem sequer as moléculas orgânicas sobreviveriam. Mesmo só com o dobro da água, a Terra ficaria inteiramente coberto de água - um verdadeiro mundo de água - com muito poucos nutrientes disponíveis.

Se os processos naturais na nebulosa tivessem atuado de forma diferente, uma Terra radicalmente diferente teria resultado. Por exemplo, a razão da Terra ser tão pobre em carbono é o facto da maior parte do mesmo se encontrar na forma de CO gasoso nas partes interiores da nebulosa. Logo não pode ser incorporado tal como o H e o He . Se tivesse existido um processo qualquer para tornar o CO sólido, então enormes quantidades deste teriam sido acretadas e o C seria o elemento dominante. O C tem cosmicamente metade da abundância do O e dez vezes a abundância do Fe , Mg e Si . Ora, um planeta genuinamente rico em C seria muito diferente da Terra.

Assim no final da formação dos planetas terrestres o processo de acreção deixou quantidades dos elementos voláteis muito menores que as atuais. Mas voltaram mais tarde na quantidade certa para a Terra como veremos a seguir. O crescimento dos embriões até completo desabrochar dos planetas terrestres levou cerca de 10^8 anos. E não cresceram mais porque o vento solar não deixou.

Entretanto nas regiões exteriores da nebulosa solar, estão-se a formar os planetas gigantes. Aí, para lá da linha de neve, as temperaturas no disco de acreção estão abaixo de -120°C e os gases voláteis condensam-se em cristais. Com o material extra existente nestes subúrbios empurrado pelo vento solar da região dos planetas terrestres formam-se embriões planetários muito maiores. Júpiter, por exemplo, tem um núcleo de silicatos rochosos e gelo cerca de 30 vezes maior do que o da Terra. A atração gravitacional destes enormes corpos é suficientemente grande para atrair grandes quantidades de gás da nebulosa. Isto por seu turno torna o planeta mais massivo, de modo que mais gás extra é puxado, num efeito de bola de neve que rapidamente produz mundos gasosos realmente gigantescos. Júpiter cresceu até atingir 318 massas terrestres. Até o vento solar expulsar os restos da nebulosa na zona onde Júpiter e os outros gigantes se formaram. Quanto a Saturno, pensa-se que se formou alguns milhões de anos depois de Júpiter e havendo menos gases para serem atraídos ficou mais pequeno. Quanto aos planetas Úrano e Neptuno também se formaram na mesma região que Júpiter e Saturno embora um pouco mais afastados do Sol e um pouco mais tarde quando já não haveria tanto material para acretar. Assim cresceram muito menos. Durante a última fase de crescimento de Júpiter as órbitas de Úrano e Neptuno tornaram-se altamente excêntricas e isso permitiu que fossem obrigados a afastar-se do Sol até às suas posições atuais - ou seja, migraram como se vai descrever mais à frente. Modelos teóricos preveem que seria pouco provável terem-se formado nas zonas onde agora se encontram mesmo com um núcleo do tamanho do de Júpiter às distâncias atuais e num intervalo de tempo igual ao da existência do Sistema Solar. Para zonas ainda mais distantes do Sol, já havia pouco material disponível para construir planetas de modo que só se formaram pequenos corpos gelados tais como Plutão e os cometas. E na zona da cintura dos asteroides a grande massa de Júpiter impediu que se formasse qualquer planeta, fazendo com que as colisões entre poeiras e/ou planetesimais fossem demasiado energéticas para permitir a sua aglomeração pela gravidade.

2.2.4. Big Splash - um impacto que originou a Lua.

Perigosamente na órbita da Terra também se formou um jovem planeta mais ou menos do tamanho de Marte, Theia. Segundo a teoria do Big Splash (Belbruno & Gott III, 2005, p. 1724) passados poucas dezenas de milhões de anos estes dois mundos colidiram entre si. Metade do manto da Terra foi explosivamente ejetado para o espaço e um tsunami de rocha fundida correu à volta do globo criando-se uma camada superficial de rocha fundida com centenas de quilómetros de espessura - um **oceano de magma**. O pequeno planeta foi quase completamente destruído, a maior

parte do seu núcleo pesado afundou-se no da Terra e as suas rochas exteriores foram ejetadas para o espaço. A maior parte deste material caiu de volta para a Terra mas algum permaneceu em órbita. O material ejetado terá, inicialmente, ficado parecido com os anéis de Saturno, embora composto por estilhaços de rocha, a circundar uma Terra brilhante, quente e vermelha. Esses estilhaços dos dois planetas destruídos reuniram-se gradualmente em pequenas luazinhas, que depois se uniram na nossa conhecida Lua. Tudo isto aconteceu há 4,527 Ganos. Mas há outras datas. De qualquer modo tudo isto aconteceu entre o início da acreção da Terra e a idade das rochas mais antigas trazidas pelos astronautas da Lua e com a idade de 4,47 Ganos. Pensa-se que este enorme impacto acelerou a rotação da Terra e a inclinação do seu eixo passou de quase zero para os 23° 27' dos dias de hoje.

2.2.5. Formação de um planeta com camadas.

Corpos com dimensões de planetesimais a mover-se com velocidades de dezenas de km/s possuem energias cinéticas fabulosas. Quando colidem entre si ou com a Terra a maior parte dessa energia transforma-se em calor. A colisão do Big Splash foi equivalente à explosão de muitos triliões de bombas H de 1 Mton cada. Não admira que a Terra tenha ficado uma imensa bola líquida, pelo menos durante algum tempo.

A radioatividade era maior nos inícios da Terra logo também gerou calor para esse fundir inicial. Ainda que presente hoje em dia em pequenas quantidades, os elementos radioativos tiveram um enorme efeito na evolução da Terra e continuam a manter o interior da terra quente mesmo hoje em dia. São a verdadeira fornalha da Terra.

Ora, com todo o seu interior fundido, os seus componentes puderam mover-se facilmente. Os materiais ou elementos mais densos, tais como o ferro e o níquel afundaram-se no núcleo; acima deste ficaram as rochas de silicatos formando um manto fundido; e os materiais menos densos flutuaram na superfície formando uma crosta delgada e que solidificou. Além disso, os materiais leves e gases aprisionados no interior subiram facilmente à superfície trazendo juntamente com eles o calor que pôde ser irradiado para o espaço e criar uma atmosfera. Uma aplicação prática natural da lei de Arquimedes. Globalmente, o planeta adquiriu uma estrutura completamente diferenciada em menos de 200×10^6 anos, com três camadas principais: o núcleo, o manto e a crosta que diferem entre si física e quimicamente

Poucos milhares de anos depois do Big Splash, o oceano global de magma fundido arrefeceu o suficiente para, primeiro, desenvolver uma “casca” e a seguir solidificar numa crosta (Dartnell, 2007, p. 82). E a atmosfera também arrefeceu o suficiente para que, o vapor de água condensasse no ar. Formaram-se então oceanos enormes, quebrados apenas por pequeninos continentes - com área total cerca de vinte vezes

menor do que a atual. O elevado calor interno alimentou vulcões enormes, cujos picos emergiram acima das ondas, tal como as ilhas do Hawai, vomitando para fora grandes volumes de gás e encobrindo o planeta numa atmosfera espessa.

Nestes inícios, a Lua encontrava-se muito mais próxima da Terra, levantando enormes marés no material fundido e mais tarde, nos oceanos que cavalgavam por sobre os continentes depois de estes se formarem. Ao longo do tempo, isto enfraqueceu a energia orbital da Lua que constantemente se afastou. A fricção das marés também diminuiu a energia da rotação da Terra que roda mais devagar agora - após a formação da Lua um dia demorava apenas 5 horas, agora 24 horas.

Pensa-se que a crosta se partiu em placas já nesta altura. E quando colidem, uma é empurrada para baixo e funde no calor do interior. Mas a atividade vulcânica desencadeada acima desta zona de subducção produziu rochas graníticas, menos densas que a crosta original. Ora, sendo mais flutuantes, não sofreram a subducção. Então emergiram formando a primeira *crosta continental*. A água reuniu-se por cima das rochas mais fundas, mais densas, da *crosta oceânica*. As rochas mais antigas da Terra são provenientes destes antigos continentes, onde os rios correram por cima de rochas duras e nuas, lixiviando-as dos minerais e levando-os para o mar que ficou salgado. Mas nesta matéria ainda se especula muito. No entanto, a apoiar a existência de crosta e oceanos nesta época tão recuada surgiram no oeste da Austrália grãos de minerais de zircão que foram datados em 4,404 Ganos (Wilde, Valley, Peck & Graham, 2002, p. 175) e 4,300 Ganos (Mojzsis, Harrison & Pidgeon, 2001, p. 179). É possível que a vida se tenha desenvolvido já nesta época mas nunca o saberemos.

2.2.6. Bombardeamento pesado tardio

Entre 4,2 Ganos e 3,8 Ganos a Terra e os outros planetas interiores foram sujeitos a uma autêntica saraivada de projeteis enormes vindos de longe - o bombardeamento pesado tardio. Porque é que isto aconteceu?

Pensa-se ser esse bombardeamento intenso o resultado da parte final da violenta formação dos planetas Úrano e Neptuno ou da passagem de uma estrela próxima através da maternidade estelar que criou o Sol ou da **migração planetária**.

Estimativas feitas por simulações, indicam que Júpiter se formou completamente a 3,5 UA do Sol perto da linha de neve (Coustonis & Encrenaz, 2013, p.10-11). O núcleo de Saturno, com 30 massas terrestres ($30 m_{\oplus}$), situou-se inicialmente a 4,5 UA. Então cresceu até às $60 m_{\oplus}$ à medida que Júpiter migrou para dentro durante 100 mil anos. Para núcleos planetários menores que $50 - 60 m_{\oplus}$ a migração interior não se dá pois atingem um raio de equilíbrio no disco (em que as forças migradoras se anulam): logo

Saturno mantém-se nas 4,5 UA. Semelhantemente os núcleos de Úrano e Neptuno iniciam-se, respetivamente, a 6 UA e 8 UA e crescem a partir de poucas m_{\oplus} sem migrar. Assim que Saturno atinge as 60 m_{\oplus} a sua migração interior começa mas é muita mais rápida que a de Júpiter já completamente crescido. Ao travar Júpiter, fica aprisionado numa ressonância 3:2 (Júpiter dá três voltas ao Sol enquanto Saturno dá duas). No preciso momento em que isto acontece, Júpiter encontra-se a 1,5 UA do Sol impedindo Marte de crescer mais. Mas a migração muda espetacularmente tudo a partir da captura em ressonância.

Júpiter e Saturno iniciam então a sua migração conjunta para fora, mantendo a ressonância 3:2. De passagem, capturam Úrano e Neptuno em ressonância (3:2 para Saturno:Úrano e 4:3 para Úrano:Neptuno) e obrigam estes planetas a mover-se também para fora. Esta migração continuou enquanto existiu gás no disco. No final mantiveram as mesmas ressonâncias em órbitas quase circulares. Convém referir que estas conclusões estão presentes no Modelo de Nice mais atual, o de 2011, (Levison, Morbidelli, Tsiganis, Nesvorný & Gomes, 2011, 142-152) e, de acordo com este, terá havido um quinto planeta gigante que foi ejetado para fora do sistema solar enquanto Úrano e Neptuno mantiveram as suas posições relativas; no modelo de 2005, o mais antigo, Úrano e Neptuno trocavam mesmo de posições – ver pdf: a Pretty Nice Model).

Ora esta situação evolui mais tarde, sob o efeito de perturbações gravitacionais, criadas pela restante matéria localizada fora da órbita de Neptuno (os planetesimais na cintura proto-Kuiper, que deveria ser bem mais massiva do que hoje, tal como se observa à volta de estrelas jovens próximas). Como resultado destas perturbações os planetas acabam por ser retirados das suas ressonâncias mútuas. E as órbitas dos gigantes gasosos passam a ser instáveis. Começam a dar-se encontros mútuos próximos e as suas órbitas repelem-se mutuamente, aumentando as distâncias entre elas até atingirem finalmente as suas localizações atuais. Como consequência, Neptuno é impelido para fora, penetrando na cintura proto-Kuiper. Então a maior parte dos pequenos corpos desta cintura são dispersos para fora do sistema solar enquanto outros são enviados para órbitas mais excêntricas. Isto tudo explica a atual fraca massa residente na cintura de Kuiper e a sua estrutura peculiar com diferentes populações, incluindo o disco disperso e os objetos em ressonância com Neptuno, se a compararmos com discos de detritos semelhantes existentes à volta de outras estrelas. E sobretudo explica o bombardeamento pesado tardio, um pico na taxa de colisões que ocorreu cerca de 4,0 - 3,8 Ganos e que se reconhece nas superfícies nuas de todos os corpos do sistema solar: Lua, Marte, Mercúrio, asteroides e satélites dos planetas gigantes. E muitos asteroides também foram ejetados.

Além disto tudo, as órbitas dos planetas terrestres também foi fortemente influenciada pela drástica mudança das órbitas dos planetas gigantes. Assim as inclinações dos eixos de rotação de alguns planetas tornam-se instáveis. E começaram a variar rapidamente (em escalas de milhões de anos) com muitas implicações para os seus climas. É o caso de Marte, onde vestígios de fósseis de glaciares têm sido identificados perto do equador, datando de uma altura em que eixo de rotação era de 45° . A Terra escapou a este destino graças à Lua.

O longo registo de crateras formadas neste período e preservadas na Lua (a erosão é praticamente nula) ilustra bem as dimensões da verdadeira tempestade de rochas e gelos que se abateu sobre todos os planetas interiores. Algumas crateras são do tamanho de continentes. Quanto à Terra pouca da superfície original deste período resta, pois foi erodida e/ou arrastada para o seu interior pela tectónica de placas, logo não se sabe o que aconteceu exatamente.

Há duas faces neste fenómeno. A má: se a vida apareceu relativamente cedo após a formação da Terra e da Lua então foi ironicamente ceifada por este bombardeamento. A grande maioria dos impactos deve ter sido pequena mas caíram vários projéteis gigantescos com centenas de quilómetros de diâmetro. Ora, devem ter-se formado várias vezes atmosferas de rocha vaporizada, os oceanos vaporizaram, efeitos de estufa descontrolaram-se subindo as temperaturas a mais de 2000°C e destruindo qualquer vestígio de vida ou moléculas orgânicas acumuladas. E várias vezes os excessos de calor acabaram por radiar para o espaço, arrefecendo rapidamente a atmosfera até se formarem gotas de água. E chuvas diluvianas caíram durante milhares de anos enchendo novamente os oceanos. Tudo o que existia nos primeiros 600 - 700 milhões de anos à superfície desapareceu.

A boa: as substâncias voláteis e orgânicas que tinham sido expulsas para além da linha de neve, foram trazidas de volta por estes cometas e meteoritos que caíram na Terra como um maná caiu dos céus: água para preencher os oceanos, CO_2 para aquecer a atmosfera e moléculas orgânicas simples formadas na nebulosa primitiva. Aliás, centenas de toneladas de carbono orgânico ainda continuam a cair na Terra por ano mas a taxa deveria ser centenas de vezes maior nessa altura. E não podia ser de ouro modo. Supõe-se que as moléculas orgânicas que se incorporaram quando se formou o planeta foram todas destruídas antes do planeta arrefecer.

2.2.7. Acabamentos finais

A atmosfera, os oceanos e os continentes influenciaram fortemente a evolução da vida mas a vida depois também influenciou a sua evolução (teoria de Gaia). Ora, os eventos envolvidos nas formações dos três estão interligados.

Como já foi dito atrás a atmosfera começou a formar-se ou talvez mesmo a reformar-se passadas centenas de anos depois do Big Splash, com os gases provenientes de duas fontes: interior do planeta e corpos que embateram na Terra (cometas e outros). Os oceanos são um produto lateral proveniente do interior e da formação da atmosfera. Gradualmente, à medida que o vapor de água arrefeceu, condensou e formou os vastos oceanos que vemos hoje em dia.

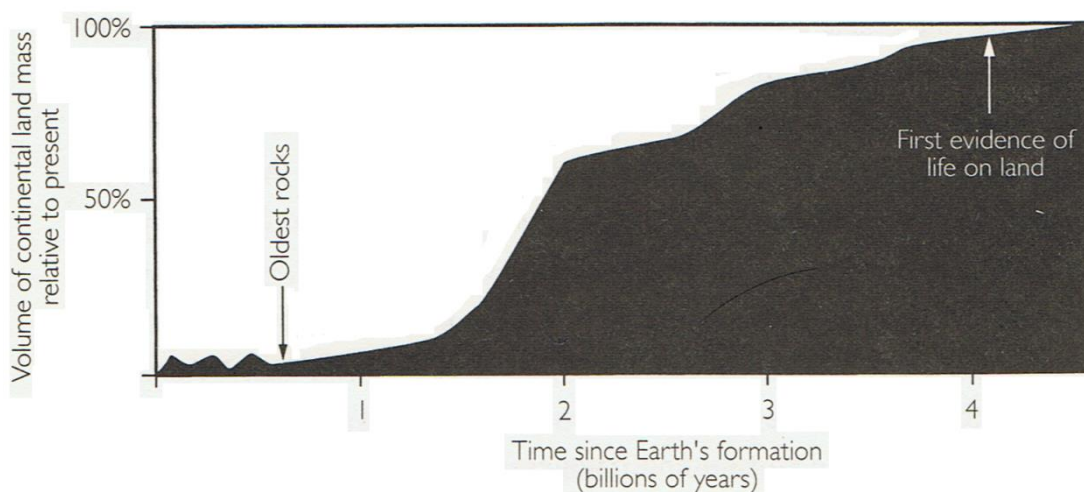


Fig.8 Estimativa do crescimento da massa continental com o tempo (adaptado de Taylor, 1992). Quase um terço da sua história, a Terra foi um planeta de água quase desprovido de vida. Fonte: *Rare Earth*, Peter D. Ward and Donald Brownlee, 2003 - pp 211

Mas põe-se uma questão pertinente: de qual das duas fontes surgiu a maioria da água dos oceanos? Do interior ou do verdadeiro maná de impactos de cometas e meteoritos que caiu sempre na Terra? Os isótopos de hidrogénio, ^2H (Deutério) e ^1H (Hidrogénio), permitem encontrar a resposta (Coustenis & Encrenaz, 2013, p.112-114). A abundância de deutério é um diagnóstico do tempo de formação e da temperatura do corpo onde ele se encontra. Medições em laboratórios permitem concluir que, quanto mais baixa é a temperatura tanto mais alto é o valor da razão D/H. Por exemplo, o valor da razão D/H (ou melhor HDO/H₂O) na água de cometas (mais exatamente do cometa Halley, em 1986 e mais dois cometas, dez anos depois) em que a temperatura de formação é apenas de poucas dezenas de kelvin (30-50 K) é de 3×10^{-4} , cerca de 15 vezes o valor protossolar e 2 vezes o valor terrestre ($1,6 \times 10^{-4}$). No caso de Úrano e Neptuno, quase só constituídos por gelos (H₂O, CH₄, NH₃, H₂S e outros) há um enriquecimento de D/H (também medido em HD/H₂ e CH₃D/CH₄) relativamente a Júpiter e Saturno (5×10^{-5} em Úrano e Neptuno e 2×10^{-5} em Júpiter e Saturno). A razão

D/H para a água dos oceanos ($1,6 \times 10^{-4}$) indica que a água não pode ser proveniente inteiramente do interior senão o seu valor teria de ser bem mais baixo, perto do valor protossolar ou mais baixo ainda pois a temperatura de formação da Terra foi alta de mais para permitir a presença de gelos. E tendo sido incorporada com os planetesimais surge outro problema: a água reagiu com os silicatos produzindo-se hidrogénio que escapou para o espaço, ou seja, essa água deverá ter desaparecido transformando-se noutras substâncias. Assim, a água dos oceanos veio mais provavelmente de projéteis externos. Mas de onde? Ora medições da razão D/H para objetos da cintura de asteroides exterior deram resultados concordantes com o das águas dos oceanos. No entanto, a medição da razão para o cometa Hartley 2 também deu um resultado concordante. Note-se que a origem deste cometa (40-100 UA) é diferente da origem dos três cometas anteriormente mencionados (Nuvem de Oort a 40 mil UA). Poderá ser este reservatório da cintura de Kuiper a origem da água terrestre? Para já parece que sim, mas mais medições são necessárias.

2.2.8. O aparecimento da vida

Quando?

Assim que o bombardeamento pesado abrandou, os impactos tornaram-se menos frequentes e menos severos e a vida finalmente pode-se desenvolver. O último grande impacto aconteceu entre 4,0 - 3,9 Ga. Passados 10^8 anos surgem já os primeiros sinais de vida nas rochas. É um período de tempo muito curto. Ora, esta rapidez espantosa merece uma rápida análise.

De facto, a maioria dos cientistas supõe que a evolução da vida demorou mais tempo: 3×10^8 anos. A primeira evidência é altamente controversa e pode mesmo ser resultado de uma má interpretação. Mas suponhamos que está certa. Então há várias hipóteses explicativas: o último grande impacto pode não ter acontecido tão recentemente, dando à vida um maior período de tempo para surgir; ou não tenha destruído toda a vida, com os poucos sobreviventes protegidos em refúgios ou até nalgumas moléculas orgânicas complexas a reiniciaram mais tarde a vida; talvez a vida tenha chegado ao planeta já formada num meteorito proveniente do sistema solar ou de outro sistema estelar. Ora, pensa-se não ser possível à vida sobreviver num grão de poeira ou algo pouco maior quando se movimentam entre sistemas estelares, logo, tal meteorito, deveria ter vindo de um planeta do sistema solar, possivelmente Marte. Ora, Marte é um alvo mais pequeno que a Terra. Então foi atingido por menos impactos durante o bombardeamento pesado e arrefeceu mais rapidamente depois de cada um deles. A vida pode até ter-se desenvolvido em Marte muito tempo antes da Terra e se tenha

transferido para o nosso planeta em torrentes de meteoritos mas só teriam sido capazes de colonizar permanentemente a Terra depois desta se tornar recetiva após o último grande impacto. Assim, é possível que toda a vida da Terra seja marciana.

Na realidade, não há provas concretas de vida ter existido ou exista em Marte. Muito mais provável é que a Terra se tenha auto-fertilizado. A vida poderá ter surgido num dos períodos entre grandes impactos, ter sido ejetada da superfície para o espaço em grandes quantidades de rochas durante um grande impacto e depois ter caído de volta para a Terra depois de esta ter recuperado e repovoado o planeta.

Mas há quem pense num aparecimento muito rápido da vida na Terra. Stanley Miller deduziu, nos anos 90, uma estimativa do tempo necessário para passar do inorgânico para a vida. A transição da sopa abiótica para as cianobactérias poderá ter demorado tão pouco como 10 milhões de anos ou menos. Ou seja, construir a vida talvez seja uma operação rápida. E inevitável. Então é mesmo muito provável que a vida seja comum no Universo e por extensão em todo o sistema solar (Ward & Brownlee, 2004, p. 66-67).

Infelizmente, não se conhece o que aconteceu exatamente na Terra entre o fim do bombardeamento pesado e as primeiras células. A química pré-biótica não deixou registos fósseis, logo é muito difícil conhecer a cadeia dos eventos. Contudo é possível recrear as condições teóricas em laboratório, testando diferentes ambientes para observar os que produzem os melhores resultados e considerar que processos poderão ter ocorrido no aparecimento de vida.

Aonde (em que ambiente) apareceu a vida?

Charles Darwin propôs que a vida teria surgido numa espécie de lagoa rasa, aquecida pelo Sol. No século XX, outros cientistas como Haldane e Oparin expandiram a ideia. Independentemente um do outro propuseram a hipótese da atmosfera na Terra primordial ser redutora. Assim sendo estaria cheia de NH_3 , CH_4 e também teria vapor de água e H_2 formando uma sopa primordial e, a partir daquela surgiria a vida em qualquer corpo de água pouco profundo. Em 1953, um aluno de Harold Urey na Universidade de Chicago, chamado Stanley Miller criou um modelo da atmosfera e do oceano pré-câmbricos num recipiente de laboratório. Ao expor a descargas elétricas uma mistura de vapor de água, NH_3 , CH_4 e H_2 e simular relâmpagos, descobriu passados alguns dias um resíduo acastanhado nesse recipiente, no qual a análise detetou aminoácidos, açúcares e nucleótidos, ou seja os blocos construtores da vida. Durante muito tempo, esta experiência foi tida como uma evidência convincente de que a origem de vida tinha as suas raízes na síntese química em atmosfera redutora.

Hoje já não se pensa assim, porque é improvável que os relâmpagos tenham sido tão frequentes como se pensava; as moléculas complexas poderiam ter-se desfeito assim que caíam das nuvens: a atmosfera primordial teria sido muito menos redutora. Assim, o hidrogénio não poderia estar presente numa quantidade tão grande sob a forma de H_2 mas sim numa forma oxidada, H_2O , como a geoquímica abaixo da superfície impõe. Também o vulcanismo generalizado teria libertado muito mais CO_2 do que CH_4 e ambos são destruídos pelos UV. Logo, o mais provável era a atmosfera ter outros constituintes principais tais como o CO_2 e N_2 , com vestígios de CH_4 e H_2 . E num ambiente vulcânico com ejeção de lava, meteoritos a cair com frequência e temperaturas altas não deveria haver muita tranquilidade para permitir a existência de muitas piscinas idílicas. Repetindo a experiência de Urey-Miller com esta mistura, o rendimento é praticamente nulo - a síntese de compostos orgânicos requer um ambiente altamente redutor. De facto, uma atmosfera destas não deveria ter favorecido a síntese generalizada de moléculas orgânicas, pelo que é muito mais razoável supor que foram libertados pelos asteroides e cometas que caíram.

Atualmente, uma nova localização para o aparecimento da vida está a impor-se (Benton, 2008, p. 37-38): as fontes hidrotermais estendidas ao longo das regiões tectónicas onde a nova crosta oceânica se cria constantemente. O *modelo hidrotérmico* da origem da vida preconiza que a transição dos aminoácidos para o ADN pode ter acontecido numa fonte quente hidrotermal associada a vulcões em atividade. Para este modelo o LUCA foi um hipertermófilo, um organismo simples que viveu em condições muito quentes. Há duas fontes principais de emissão de água quente na atualidade: as “chaminés negras” ou “chaminés hidrotermais” (black smokers) sobre as fendas no fundo dos oceanos em que o magma e a água salgada se encontram, e as piscinas quentes e as fumarolas cheias pelas águas das chuvas e que estão na proximidade de vulcões em atividade.

Há, no entanto, outro possível local de proveniência já referido atrás: outro corpo do Sistema Solar.

Como é que se passou do inorgânico para o orgânico?

Determinar como é que as primeiras moléculas do DNA apareceram na Terra tem sido um problema muito difícil de resolver cientificamente. Ainda ninguém conseguiu juntar várias substâncias químicas num tubo de ensaio e criar uma molécula do DNA. E depois é preciso passar do DNA para a célula.

Há várias teorias quanto à sequência do que se passou.

Segundo o modelo de Oparin-Haldane (Benton, 2008, p. 38-41), a vida poderia ter surgido a partir de uma série de reações químicas orgânicas que produziram estruturas orgânicas cada vez mais complexas. É a chamada química pré-biótica. De seguida as moléculas complexas separaram-se do meio circundante, adquirindo algumas características dos organismos vivos. Tornaram-se capazes de absorver nutrientes, crescer, dividir (reproduzir-se) e por aí adiante. A experiência de Urey-Miller em 1953 permitiu passar do inorgânico para algumas substâncias orgânicas e as experiências que se seguiram realmente resultaram na produção de moléculas orgânicas de maior dimensão (polipéptidos, polissacarídeos). Sydney Fox da Universidade do estado da Florida até conseguiu criar estruturas aparentadas às células nas quais uma sopa de moléculas orgânicas se via retida por uma membrana. As suas “protocélulas” pareciam alimentar-se e reproduzir-se mas não sobreviviam por muito tempo. Logo não eram seres vivos.

O modelo de Oparin-Miller entrou num impasse: as duas funções principais de um ser vivo são: ter um código genético e ter a faculdade de produzir reações químicas, ou seja, um metabolismo. A primeira é desempenhada pelos genes e a segunda pelas enzimas. Ora, quem surgiu primeiro: as enzimas ou os genes? Um problema do tipo: quem apareceu primeiro? O ovo ou a galinha?

Ora supõe-se agora que surgiram as duas ao mesmo tempo. Primeiro surgiu uma molécula - RNA - que podia desempenhar as duas funções. Estas moléculas não tinham invólucro mas podiam juntar-se umas com as outras acidentalmente em meios favoráveis. Supõe-se até que houve época na história da Terra em que estas moléculas foram dominantes - o mundo RNA - mas depois desapareceram. Esse mundo antecedeu os fósseis mais antigos e as primeiras células e a temperatura deveria ser relativamente baixa.

Para se dar o passo em frente e criar uma célula viva, podem ter acontecido duas fases: a produção de uma protocélula através da combinação de uma enzima RNA e uma bolha capaz de se auto-replicar e a seguir várias protocélulas tiveram de se manter juntas num outro compartimento maior designado por bolha autorreplicativa.

Mas há outra teoria que indica que a vida surgiu na argila ou cristais de pirite (Ward & Brownlee, 2004, p. 65-66). As faces destes minerais e cristais apresentam regiões microscópicas onde moléculas orgânicas antigas se acumularam. O modelo sugere a progressão seguinte: dos cristais de argila (mineral) ao crescimento dos cristais, seguida pela aquisição orgânica (onde as moléculas puramente inorgânicas são substituídas por moléculas baseadas no carbono) permitindo a formação de

macromoléculas que por seu turno levam ao DNA e às células. Assim a vida mais antiga poderia ser caracterizada por evolução; baixa tecnologia, com poucos genes e pouco especializados; fabricada de materiais geoquímicos, resultante de reações de condensação em superfícies sólidas da pirite ou de membranas de sulfureto de ferro.

Os dois modelos têm como pontos principais a necessidade de juntar vários componentes químicos de determinada forma e depois, desses agregados, construir moléculas muito mais complexas. Mas, os vários produtos químicos são reunidos em meios diferentes: água no modelo RNA, e meio mineral no outro. E não há consenso qual das alternativas é correta - ou mesmo se são as únicas possíveis.

2.2.9 Os primeiros fósseis

Quando a Terra se formou não havia vida e era inóspita mas passados cerca de 1 Ganos estava cheia de micróbios. Mas não de seres multicelulares.

Pelo registo fóssil, primeiro apareceram os micróbios e só depois a partir destes evoluíram todos os organismos multicelulares. Também nos mostra que na maior parte da história da Terra só evoluem micróbios unicelulares. De facto, os mais antigos fósseis de micróbios presentes em rochas têm a idade de 3,5 Ganos e os fósseis de organismos multicelulares só surgem em rochas com idades inferiores a 1 Ganos.

A teoria da evolução prevê que todos os seres vivos atuais e do passado são o resultado da evolução a partir de um único organismo - o LUCA (last universal common ancestor). Esse organismo, que não se sabe muito bem o que era, deverá ter aparecido por volta de 3,8 Ganos.

As primeiras formas de vida teriam sido autotróficas ou heterotróficas?

Se a atmosfera primordial foi predominantemente redutora, as reações abióticas, desencadeadas por raios UV, relâmpagos ou fumarolas negras, podem ter fornecido às primeiras células uma quantidade enorme de substâncias orgânicas complexas. Mas a biosfera cresceu e esta oferta de alimentos diminuiu gradualmente, obrigando as células famintas a desenvolver novos métodos de gerar as substâncias de que necessitavam para si mesmas; logo, a heterotrofia passa a autotrofia. Se a atmosfera foi menos redutora, a autotrofia poderá ter-se desenvolvido em primeiro lugar, e a heterotrofia seria uma adaptação que se deu depois para viver fora dos esforços dos autotrofos (Dartnell, 2007, p. 95). Portanto não se sabe se era auto ou hetero mas de uma maneira ou de outra a mãe de toda a vida na Terra poderá ter sido um hipertermófilo. Ou, se já tinha existido vida bastante antes do bombardeamento pesado, esse hipertermófilo pode ter sido a única célula sobrevivente e que depois repovoou o mundo.

2.2.10. A fotossíntese e a revolução de oxigénio

A autotrofia permite às células viverem sem ser necessário moléculas orgânicas. Mas a quimiossíntese ainda restringe a vida a pequenas zonas onde há abruptos gradientes redox - é o que se passa em torno das chaminés negras ou em torno das piscinas hidrotermais. Ora, o desenvolvimento da fotossíntese permitiu libertar as células desses locais e deixá-las livres para colonizar toda a Terra.

Supõe-se que a vida naquela altura deve ter desenvolvido moléculas capazes de absorver os raios UV (não havia camada de ozono!...). Mas um fóton UV tem uma quantidade enorme de energia. E uma vez absorvido, essas moléculas devem dissipar a sua energia antes de absorver mais. Uma forma de fazer isto é passar eletrões excitados para as proteínas vizinhas. Os primeiros organismos fotossintéticos, utilizavam a energia dos eletrões desperdiçados para fixar carbono e realizar reações redox úteis. No entanto, os eletrões perdidos precisam de ser repostos constantemente; logo deve haver redutores próximos para os fornecerem. Algumas bactérias vão buscar esses eletrões oxidando H_2S , uma substância química abundante nas piscinas hidrotermais, mas para ser totalmente autónoma uma célula deve cortar este laço final. A solução que a natureza encontrou foi tirar os eletrões de moléculas de água. A fotossíntese permitiu assim o uso de uma fonte de energia praticamente inesgotável pois água havia muita. Apesar de ser necessário muita mais energia para separar moléculas de água também é possível extrair muito mais energia para a célula (Dartnell, 2007, p. 99-108).

Mas a fotossíntese resulta na formação do O_2 (g) que na altura era um veneno para a vida existente. Aconteceu então uma das maiores rupturas ecológicas da história. O oxigénio era altamente reativo e com o tempo acabou por atingir os níveis atuais.

Tudo isto se iniciou com as cianobactérias há cerca de 3,5 Ganos. No entanto os primeiros sinais de aumento de O_2 na atmosfera só apareceram 1 Gano depois. De facto, a atmosfera e a água tornaram-se progressivamente oxidantes e os minerais expostos a ela foram oxidados. A superfície do planeta foi literalmente enferrujando. Quando a crosta da Terra absorveu todo o oxigénio possível a atmosfera começou a acumulá-lo. E o nível atmosférico começou a subir rapidamente. A vida anaeróbica começou a limitar-se a locais onde o O_2 não chegava. Há cerca de 2,2 Ganos, a concentração de O_2 era já cerca de 1% do seu valor atual e de repente dá-se outra revolução. A vida começou a tirar partido do elevado poder oxidante do O_2 em seu proveito - surgem as células aeróbicas que se adaptam aos níveis crescentes de O_2 .

Na alta atmosfera também se começou a produzir um efeito muito importante para a vida. O oxigénio começou a ser dividido pelas radiações UV obtendo-se o ozono. Esta substância é um forte absorvente de radiações UV. Com o passar do tempo criou-se uma camada de ozono na atmosfera que passou a servir de escudo contra essas radiações UV, limitando as quantidades destas que atingiam a superfície. Calcula-se o nível de radiações UV na Terra primordial cerca de 40 vezes superior ao atual.

Convém realçar que foi a pouca quantidade de compostos inorgânicos redutores que limitou a propagação da vida sem oxigénio. A fotossíntese utiliza recursos bem mais abundantes e permite que as células se reconstruam a elas próprias usando simplesmente o CO₂, a água e a energia da luz do Sol. Estes blocos de construção simples são suscetíveis de ser comuns noutros planetas terrestres e em muitos sistemas planetários através da galáxia. E se a vida nesses sistemas existir também poderá ter-se desenvolvido a fotossíntese. Surge a hipótese de se poder identificar a vida a anos-luz de distância identificando as substâncias resultantes da fotossíntese.

2.2.11. Os Eucariontes e os organismos multicelulares

Os primeiros eucariontes apareceram cerca de 2 Ganos atrás. Mas a sua datação é muito difícil porque as primeiras células eram tão pequenas como os archaea ou bactéria e não tinham parede celular para deixar um fóssil reconhecível. A sua evolução é paralela, curiosamente, ao aumento dos níveis de oxigénio o que provavelmente não é uma coincidência. O aparecimento do núcleo pode ter sido motivado pela necessidade de proteger o frágil DNA da oxidação. A endossimbiose com a absorção de mitocôndrias e cloroplastos como organelos dá-se também por necessidades de segurança contra o poder destrutivo de uma má manipulação de oxigénio. As mitocôndrias passam a realizar as reações energéticas de maior risco e os cloroplastos (supostos descendentes das cianobactérias) realizam a fotossíntese. E dentro da célula eucarionte estão mais protegidos.

Mas aconteceu também algo mais extraordinário ainda. De facto, a unidade faz a força. Se os organismos forem maiores ficam mais seguros de predadores, são mais eficientes na captação e armazenamento de nutrientes, podem regular melhor seu ambiente interno e a divisão do trabalho pode tornar todo o organismo mais versátil. Com estas vantagens as células eucariontes uniram-se para formar os organismos multicelulares. E os primeiros surgiram à volta de 1 Gano atrás.

Mas os procariontes continuaram unicelulares: talvez sejam incapazes de possuir o controlo genético necessário para a multicelularidade. No entanto, continuam os organismos mais bem-sucedidos do planeta, perfeitamente adaptados a reprodução rápida e capazes de explorar uma variedade enorme de fontes de energia.

2.2.12. A Explosão Câmbrica e a "Terra bola de neve"

Mais ou menos há cerca de 750×10^6 anos surgiram os primeiros animais complexos. Linhas de evidência genética indicam aquele valor, embora os primeiros fósseis desses seres apontem idades de 600×10^6 anos. A complexidade exigiu uma série de desenvolvimentos cruciais, incluindo a proteína *collagen* - um componente da matriz extracelular que contém células animais juntas - e genes *homeobox*, um conjunto de opções que estabelecem as características de um plano corporal.

Cerca de 540×10^6 de anos atrás, o nível de oxigénio na atmosfera era de cerca de 10% de seu valor atual. De repente dá-se uma verdadeira revolução que pode ser inferida pelo registo fóssil: uma espetacular diversificação de animais marinhos. Todas as formas básicas dos organismos que vemos hoje, como os dos moluscos (como mexilhões e caracóis), artrópodes (como lagostas e insetos) e cordados (como os seres humanos e peixes), apareceram pela primeira vez nos fósseis deste período. E esses fósseis também documentam formas muitas estranhas mas maravilhosas que não sobreviveram até aos nossos dias, como o *Anomalocaris*.

A causa dessa verdadeira enxurrada aparente de inovação evolutiva - a *Explosão Câmbrica* - é muito debatida. Alguns argumentam que ela não representa um evento biológico súbito, mas sim que as condições de fossilização mudaram e só então as espécies pré-existentes puderam ser preservados. Outros afirmam que um incidente específico desencadeou uma corrida evolutiva entre os organismos concorrentes. Por exemplo, a evolução do olho teria permitido a caça ativa, provocando uma corrida de adaptações em predadores e presas. Outra explicação tem a ver com o clima do planeta. O clima atual da Terra parece ser invulgarmente frio; em 90% de sua história não havia camada de gelo nos polos. Os registros de clima, obtidos das rochas, mostram que, em muitas ocasiões, entre 750 - 600×10^6 anos atrás uma glaciação profunda se abateu sobre o planeta. Ora isto fez colapsar os ecossistemas de superfície, como também ficaram perto de aniquilar completamente os eucariontes.

Uma vez iniciado o arrefecimento, as crescentes regiões de gelo branco refletiram mais e mais o calor do Sol, criando condições para haver ainda mais frio. As calotas polares expandiram-se, até quase tocarem no equador ou até podem mesmo ter coberto toda a superfície de uma grossa camada de gelo. Os mares desta "*Terra bola de neve*" ficaram tapados, bloqueando a luz solar e causando uma queda vertiginosa na fotossíntese. Privados da fonte de oxigénio, os mares ficaram anóxicos, pela primeira vez em mais de 1 Ganos. A Terra como que sufocou e grandes números de organismos ter-se-ia extinguido. É evidente que, alguns procariontes e eucariontes nossos antepassados conseguiram sobreviver, agarrando-se a "paraísos" de degelo

ou gelo fino sobre o supercontinente ou buracos nos glaciares à volta de ilhas vulcânicas, senão não estávamos aqui. Alguns pesquisadores têm dúvidas de que a superfície tenha congelado completamente e defendem mais de uma “Slushball Earth”, (Terra de lama) com bolsões de água limpa.

Seja de que forma for, cada uma dessas épicas Idades do Gelo duraram vários milhões de anos e terminaram devido ao vulcanismo ativo do nosso planeta. Com a erosão de rochas de silicato quase inexistente, o CO₂ acumulou-se no ar até atingir níveis 350 vezes o seu valor atual. O efeito de estufa poderoso criado por uma tal atmosfera bem isolada começou a descongelar o planeta. Durante este período de recuperação, o clima teria sido absolutamente frenético. Ondulações gigantes em rochas sedimentares desse tempo sugerem tempestades de longa duração através dos mares. O clima finalmente atingiu o equilíbrio e a vida repovoou os seus antigos nichos. Mas essa libertação de um ambiente tão duro, obrigou a evolução a criar os animais complexos, levando à Explosão Câmbrica.

Como esta viagem através do tempo se aproxima do dia moderno, vemos plantas multicelulares e animais juntando-se aos procariontes na colonização da terra, os outrora estéreis continentes florescendo verdes com a vegetação, com as plantas a desenvolverem folhas achatadas, madeira rígida e, finalmente, flores e frutos. Os animais por sua vez desenvolvem as suas próprias adaptações, surgindo os ovos, o voo, a fisiologia de sangue quente e inteligência e atualmente a inteligência auto-consciente à medida que os continentes deslizam para as suas posições conhecidas.

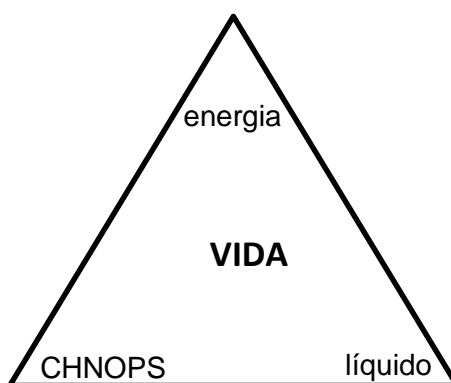
A extinção é como que uma parte natural da evolução tal como a inovação e o aparecimento de novas formas. O nível constante de fundo da extinção é como o crepitar suave de estática num rádio desafinado, mas de vez em quando um grande impulso de morte atinge todo o planeta. Desde a Explosão Câmbrica, houve 5 extinções em massa devastadoras, cada uma acabando com uma grande fração da vida marinha e terrestre. Tais catástrofes podem estar ligadas a eventos na galáxia à nossa volta. A que aconteceu há 65 milhões de anos, sabe-se com confiança que foi provocada por um impacto massivo.

Pensa-se que a vida multicelular especialmente complexa que vive na Terra, a vida animal, é, possivelmente, algo de anómalo. A vasta maioria da galáxia provavelmente é apenas adequada para a vida microbiana, bactérias resistentes, com organismos capazes de sobreviver em ambientes relativamente duros. As formas superiores de vida são muito mais sensíveis a perturbações ambientais, requerem longos períodos de estabilidade para evoluir e precisam de ecossistemas estabelecidos para satisfazer

as suas grandes necessidades de energia. Qualquer forma de vida extraterrestre que se possa encontrar, provavelmente, será análoga aos nossos procariontes, com muito menos mundos tendo progredido para a fase eucarionte, muito menos animais multicelulares ou ecossistemas em terra. A galáxia pode muito bem estar repleta de diferentes formas de vida, mas será necessário um microscópio para os ver. Certamente dentro de nosso próprio quintal cósmico, o sistema solar, há pouca esperança em encontrar vida mais complexa que os procariontes unicelulares. Agora viremos a nosso olhar para o sistema solar à procura de vida.

2.3. POR TODA A PARTE NO SISTEMA SOLAR

O potencial de um planeta ou lua para ter vida pode ser avaliado por três critérios: a existência de uma fonte de energia que possa ser explorada pela vida; a possibilidade de haver química de carbono polimérica e a presença de um solvente líquido. Com estes critérios em mente pode-se apreciar o potencial que cada corpo tem no sistema solar para ter vida. Podemos até colocar estes três critérios num triângulo - triângulo da habitabilidade - (Coustenis & Encrenaz, 2013, p. 138). Trata-se evidentemente de condições necessárias.



Já se acreditou que o Sol pudesse conter seres vivos. Proponentes dessa teoria incluíram William Herschell, no século XVIII, o descobridor de Úrano. Mas a ardente violência da sua “fornalha” termonuclear impede a existência de qualquer estabilidade mínima necessária para se formarem as estruturas complexas características dos seres vivos o que torna impossível que aí habite qualquer forma de vida que possamos imaginar (Dartnell, 2007, p.130-132).

Começando pelos planetas terrestres só um deles tem água líquida: a nossa Terra. Mercúrio é muito quente - apesar de recentemente se ter descoberto água, está no estado sólido e não há sinais de substâncias orgânicas - mas Vénus apresenta, pelo menos, a esperança da vida.

Além de Marte encontra-se um anel de rochas, a cintura de asteroides, e no que respeita à vida há os casos interessantes de Ceres e Vesta.

Mais adiante situam-se os planetas gigantes, Júpiter, Saturno, e Úrano e Neptuno, cada um com uma espessa atmosfera. O “ground zero” dos gigantes de gás (se eles tiverem superfícies sólidas) é extremamente hostil e apresenta condições impossíveis para quaisquer solventes líquidos ou orgânicos. Mas no alto por entre as nuvens de Júpiter e Saturno, no entanto, são produzidas moléculas orgânicas através de reações do tipo obtido nas experiências de Urey-Miller e alguns pesquisadores põem a

hipótese de poder haver um ecossistema aéreo. Micróbios heterotróficos, ou, possivelmente, até mesmo fotossintéticos, podem flutuar sobre correntes ascendentes na atmosfera, crescendo e reproduzindo-se rapidamente antes de se afundarem para baixo caindo no calor letal e pressão do interior. Outras criaturas, podem manter-se flutuantes com grandes sacos de hidrogénio, e alimentar-se do plâncton presente, flutuando entre as nuvens, como dirigíveis-baleias. No entanto, isso é pouco mais do que ficção científica e os gigantes gasosos são geralmente postos de lado como prováveis moradas. As luas internas do sistema de Júpiter são possibilidades muito mais fortes, entre as quais se realça Europa um mundo gelado. Se o requisito de água líquida passar para segundo plano e considerarmos outros solventes e uma bioquímica talvez mais exótica, podemos ir até à maior lua de Saturno, Titã, que também pode ser um possível habitat. Para além de Neptuno, onde a nebulosa solar era mais diluída, uma horda de pequenos planetóides, semelhantes a Plutão, e vastos números de cometas gelados esconde-se na periferia do sistema solar. Ora estes corpos podem ter desempenhado um papel importante no aparecimento da vida noutros corpos do sistema solar devido às substâncias voláteis varridas pelo Sol que foram lá parar. Apesar de serem muito frios por fora, há casos interessantes.

Dos objetos do nosso sistema solar, os cinco potenciais habitats extraterrestres mais importantes são: Marte, Europa, Enceladus, Titã e Vénus. Iniciemos a busca.

2.3.1 Mercúrio e Lua

São astros pequenos. Logo, incapazes de atrair uma atmosfera suficientemente densa. Têm água só que, à superfície, nunca poderá estar no estado líquido. Aí a pressão é praticamente nula e como a água se encontra nalgumas crateras nos polos que não recebem luz do Sol está no estado sólido. E se fosse aquecida sublimava. A única hipótese é haver vida a grandes profundidades e de natureza extremófila. Ao ter uma órbita tão excêntrica, Mercúrio deve ter o seu interior bastante aquecido por forças de maré que pode compensar as perdas rápidas de calor devidas ao seu tamanho. Ora se aí existir água ela poderá estar no estado líquido. Que o seu interior deverá estar em parte líquido está bem demonstrado pela existência de um campo magnético, apesar de ser muito fraco. Mas é pouco provável haver substâncias voláteis no seu interior e à superfície são raras. A superfície não tem proteção contra os raios UV e as partículas emitidas pelos flares solares. Na Lua também há forças de maré intensas a atuar (apesar da translação ser síncrona a órbita é elítica). A situação é semelhante à de mercúrio.

2.3.2. Vénus, o planeta vulcânico

Nos romances de ficção científica do início do século XX, Vénus era um planeta mais quente que a Terra mas habitável para o Homem. Havia florestas verdes e exuberantes escondidas nas brumas da sua atmosfera. Mas esta visão ideal caiu por Terra quando as primeiras missões aterraram em Vénus (e as primeiras caíram mesmo...); de facto, a sua superfície é totalmente inóspita.

A sua atmosfera, composta quase inteiramente de CO_2 e um pouco de N_2 , é muito espessa, produzindo uma pressão à superfície que é cerca de 90 vezes a existente na Terra ao nível do mar, e criando um efeito estufa radical que aquece o solo dos 35°C que deveria ter até à temperatura média de 470°C . O que é suficiente para, nas terras baixas, vaporizar galena (essencialmente PbS) que vai cair no chão das altas montanhas sob a forma de uma chuva metálica brilhante. O solo é uma superfície dura de rocha erodida estéril, irrompida do interior durante eventuais crises intensas de vulcanismo. Nestas condições de temperatura e pressão é impossível haver água líquida à superfície. E a pouca que há encontra-se a elevada altitude. Além disso, a temperatura e a pressão diminuem com a altitude. Mas a elevadas altitudes surge outro problema: há muito ácido sulfúrico, H_2SO_4 . Ocasionalmente, há chuvas deste ácido a cair da alta atmosfera, mas a 25 km de altitude evaporam-se outra vez pelo que nunca chegam ao solo. É um autêntico inferno.

Ora, nenhuma forma de vida é possível à superfície: nem os blocos poliméricos das moléculas da vida nem um solvente líquido poderiam resistir a essas condições.

Mas há sinais nítidos de que terá havido água líquida em abundância no passado. E atrás da água é de esperar vida. Os cientistas ainda não desistiram completamente.

Com um tamanho e massa muito semelhantes aos da Terra deve ter recebido o mesmo complemento de substâncias voláteis durante o bombardeamento pesado. Por isso, é muito provável que, na sua juventude, os dois planetas tenham sido muito mais parecidos, com atmosferas e oceanos de água semelhantes. Como a zona habitável estava mais próxima pois o brilho do sol era mais fraco, e com os blocos de construção orgânica que foram lá parar é até possível que a vida tenha começado. No entanto, a partir de algum momento, tudo mudou. Estando mais perto do Sol, e com este a brilhar mais talvez Vénus tenha aquecido a uma taxa cada vez maior. Até os seus mares terão fervido. A água subiu alto no atmosfera, onde foi decomposta pelos raios UV solares em H_2 e O_2 . E foi essa água toda na atmosfera que despoletou o efeito de estufa. O H_2 escapou para o espaço pois é uma molécula muito leve para a gravidade de Vénus a reter. Assim, os oceanos de Vénus desapareceram para sempre. O O_2 reagiu com a rocha à superfície e agora não há quase nenhuma água

em Vénus, nem mesmo na atmosfera. Quanto ao CO₂ a sua percentagem aumentou progressivamente devido á perda constante de vapor de água. Não podendo ser consumido num ciclo silicatos-CO₂ não foi fixado pela crosta de Vénus.

Uma evidência desse escape de hidrogénio pode ser inferida pela razão isotópica, ²H/¹H, medida pelas missões *Pioneer* e *Venus Express* em Vénus e que deu valores de 100 a 150 vezes superiores ao valor obtido na Terra. O hidrogénio-1 é mais leve que o deutério, logo escapa-se mais facilmente para o espaço. Ao longo de Ganos o isótopo mais pesado torna-se cada vez mais abundante. A perda de iões provocada pelo vento solar na alta atmosfera mostra duas vezes mais iões H⁺ do que iões O⁺ : só pode ser água (ESA - Venus Express, 2010). Não se sabe exatamente quando é que isto ocorreu em Vénus, mas pensa-se que poderá ter sido há cerca de 2,6 Ganos.

A superfície tem vulcões por todo o lado, várias vezes mais que a Terra. Medições diretas mostram que a maioria das rochas são basálticas. Parecidas com as rochas existentes no fundo das bacias oceânicas terrestres. As planícies são feitas de lava.

Nenhuma rocha tem mais de 600x10⁶ anos. Enquanto na Terra 70% é reciclado em 180x10⁶ anos deixando a superfície dos continentes quase inalterada, em Vénus é tudo reciclado. Por contagem das crateras, a idade da crosta de Vénus situa-se entre 500-700x10⁶ anos. Mas são poucas, e só com dimensões acima de um valor mínimo pois a atmosfera é tão densa que destrói os

Parâmetros e propriedades	Vénus	Terra
Distância média ao Sol (em UA)	0,72	1,0
Período de Rotação (em dias terrestres)	-243,7	1,0
Período de translação (em dias terrestres)	224,1	365,25
Diâmetro equatorial (em km)	12104	12756
Massa (em m _{Terra})	0,8	1,0
Massa (em unidades 10 ²² kg)	487	597
Densidade relativa	5,24	5,52
Densidade da atmosfera (g/ cm ³) no solo	0,067	0,0013
Temperatura média à superfície (em °C)	470	15
Albedo normal	0,65	0,30
Composição da atmosfera (% V)	CO ₂ (96,5) N ₂ (3,5) SO ₂ (0,015) Ar (0,007) H ₂ O (0,002) CO (0,0017)	N ₂ (78%) O ₂ (21%) Ar (1%)

meteoritos mais pequenos antes de chegarem à superfície (como aconteceu com algumas sondas soviéticas). Por outro lado a maior parte dessas mesmas crateras mantém-se inalterada ao longo do tempo. Isto leva a concluir que há cerca de 600x10⁶ anos a superfície de Vénus sofreu uma renovação total e que este episódio durou menos de 10x10⁶ anos (Sotin, Grasset & Tobie, 2009, p. 242-243). Depois desse episódio não mais do que 5% da superfície sofreu nova renovação. Ora, isto pode ter sido a último episódio de uma série cíclica de subducções catastróficas da litosfera do planeta. Assim, o vulcanismo terá renovado periodicamente a crosta, apagando

qualquer traço da vida anterior. Não há nenhuma hipótese de encontrar evidências de antigos oceanos ou fósseis de células.

Porque é que tudo isto se passa? A Terra perde calor regularmente para o espaço através das placas tectónicas. Mas em Vénus só há uma placa e bastante espessa a cobrir o planeta. Assim sendo o calor não tem por onde escapar e vai-se acumulando lentamente no interior até este não aguentar mais. E quando isso se dá toda a crosta afunda surgindo uma totalmente nova. Uma espécie de botija de gás a ser aquecida!... E isto pode-se repetir várias vezes. Falta a água que poderia lubrificar as fraturas que também se formam localmente na superfície e ajudam a aliviar a tensão deixando o calor escapar. E não havendo tectónica de placas, não há campo magnético.

Apesar destas condições desfavoráveis há no entanto um local em Vénus que alguns cientistas acham que poderia ser habitado. Nas altas camadas de nuvens que cobrem Vénus as condições existentes não parecem ser muito diferentes da superfície da Terra quanto à pressão e temperatura. Assim, a cerca de 50 km acima do solo, a temperatura cai para uns 40 °C e a pressão atmosférica é apenas 70% da pressão atmosférica ao nível dos mares terrestres. Há aí também pequenas quantidades de água. Não se conhece a concentração de H_2SO_4 , mas é provável que esteja dentro da tolerância dos acidófilos terrestres e portanto, pode perfeitamente ser alimento para esses extremófilos. Há também quem até defenda que a existência de H_2S e SO_2 e a quase ausência de CO na atmosfera se pode dever a micróbios. Essas formas de vida poderiam ter-se desenvolvido em períodos mais favoráveis no início da história de Vénus e depois ter-se adaptado a novas condições quando o efeito de estufa descontrolado tomou conta do planeta. A vida prospera em praticamente todos os ambientes húmidos terrestres, mas, embora as células tenham sido detetados na alta estratosfera da Terra, é muito duvidoso que um ecossistema possa ser suportado apenas em nuvens, sem nunca descer à superfície. Se tal forma de vida fosse possível até os céus terrestres teriam sido colonizados e as nuvens da Terra seriam talvez verdes com os micróbios fotossintéticos. Foi descoberto recentemente ozono, O_3 (ESA - *Venus Express*, 2011) mas em pouquíssimas quantidades. Mas deve ter origem não biológica, mais exatamente, devido à quebra do CO_2 pelos UV do Sol.

Observando Vénus em UV, algo se destaca na camada de nuvens. Um sistema complexo e altamente dinâmico de redemoinhos escuros contrasta com um fundo mais claro, variando de padrões localizados a enormes estrias em todo o planeta. Estas regiões negras demonstram que a luz UV está a ser absorvida e representam quase metade do total absorvido pelo planeta. Poderão ser estas regiões vastas

florações de micróbios venusianos de elevada altitude? Provavelmente não - mas não subestimemos o poder da vida para se adaptar a todos os nichos possíveis.

2.3.3. Marte, o planeta vermelho

Marte, o planeta vermelho, é o quarto calhau a contar do Sol - mas é o que mais atenção teve e tem quanto às perspectivas de vida extraterrestre.

A presença de vida neste planeta há muito que faz parte do imaginário humano. Já muitos filmes e obras de ficção científica se construíram à volta da vida em Marte. Ainda nos anos 60, textos explicavam as flutuações nas manchas escuras visíveis na sua superfície como variações sazonais na sua vegetação. Percival Lowell, no início do século vinte, observou uma extensa rede de linhas a cruzar-se na superfície de Marte, interpretando-as como canais artificiais construídos por uma civilização muito mais avançada que a nossa, desesperadamente a tentar sobreviver num planeta moribundo pelo transporte de água derretida dos polos para as cidades e explorações agrícolas situadas à volta do equador. Sabe-se hoje que isso não passa de ilusões de ótica. E séries de sondas robóticas deram cabo de todas as esperanças em encontrar marcianos inteligentes que nos compreendam. De facto, hoje em dia todo o planeta já foi mapeado por laser com uma precisão suficiente para detetar quaisquer estruturas macroscópicas que tenham sido construídas por seres extraterrestres. Mas, infelizmente, nada se detetou. Portanto é de excluir a existência de seres complexos pelo menos à superfície do planeta. Contudo não é de excluir a possibilidade de existência de vida microscópica subterrânea (Dartnell, 2007, 109-129).

No entanto muitas outras coisas interessantes se descobriram: por exemplo observam-se em Marte muitos sinais de ocorrerem e/ou terem ocorrido processos geológicos e outros semelhantes aos que ocorrem e/ou ocorreram na Terra.

Marte, na sua juventude, era muito mais vulcânico que agora e há evidência experimental de que Marte já teve uma limitada tectónica de placas muito cedo na sua história. A geografia de Marte, e não só, teria muitas entradas num livro de recordes. É o que apresenta a maior diferença de alturas entre acidentes geográficos na sua superfície: trinta quilómetros entre o pico mais elevado e a bacia mais profunda (na Terra a maior diferença de altitudes, entre o monte Everest e a fossa das Marianas, é cerca de 18 km). Possui a maior montanha do sistema solar - Olympus Mons - com 25 km de altura, quase três vezes mais alta que o monte Everest, situando-se acima da maior parte da atmosfera de Marte. A protuberância de Tharsis é uma expansão colossal da crosta marciana: o planeta nunca teve uma tectónica de placas substancial logo este ponto quente de magma tem permanecido acima de mesma localização na superfície, permitindo que grandes vulcões duradouros cresçam até tamanhos

enormes. Uma cadeia de três vulcões gigantescos estende-se pelo equador superando totalmente qualquer montanha da Terra. O *Valles Marineris* corre para leste a quatro mil quilômetros de distância da protuberância de *Tharsis*, cortando a crosta marciana até profundidades de 7 quilômetros nalguns lugares, fazendo o *Grand Canyon* parecer um arranhão superficial. É um dos poucos aspectos atuais que pode ser identificado como um dos canais de Lowell. O ponto mais baixo em Marte situa-se

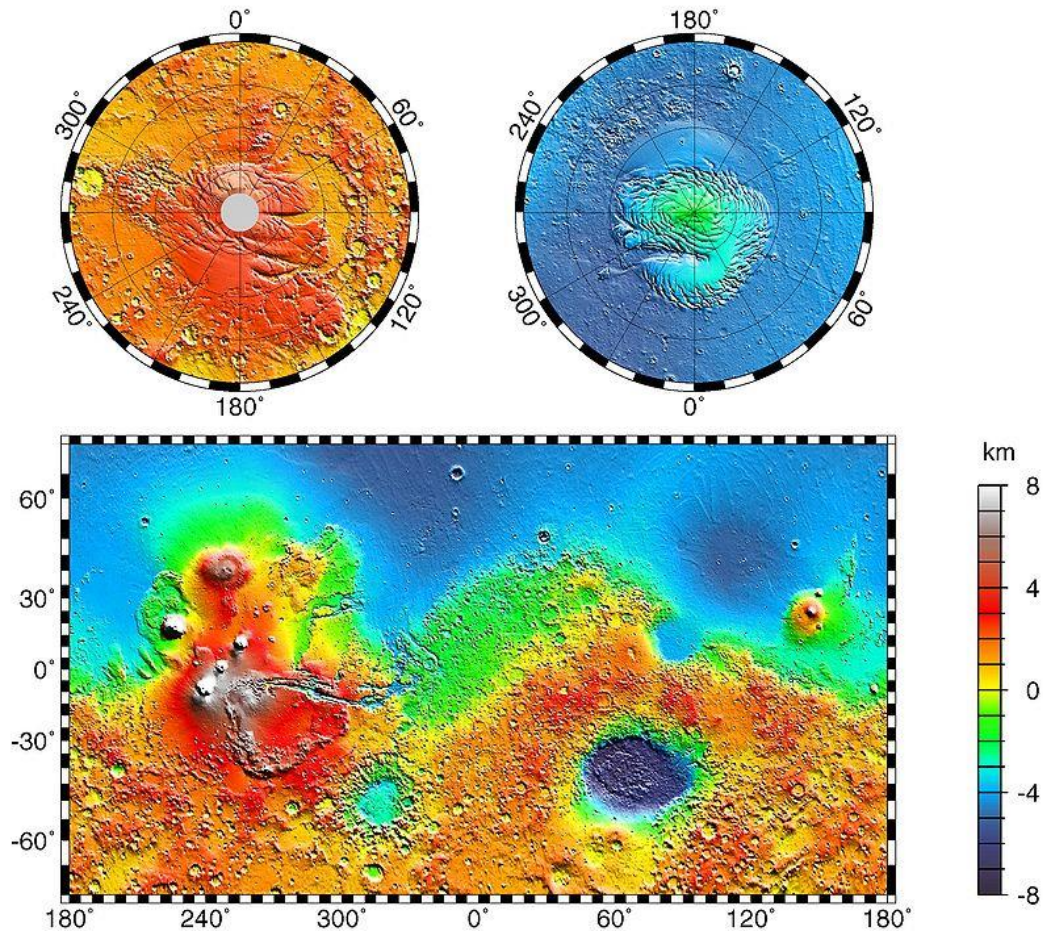


Fig. 9 Mapa de Marte. Fonte: retirado da net

na enorme bacia de impacto *Hellas*, bordada de vários anéis exteriores de montanhas ao longo de quatro mil quilômetros de extensão. Pensa-se ter sido criada durante o bombardeamento pesado, e muito do enorme volume da rocha projetada foi formar os anéis circundantes. Mas o aspecto mais notável da superfície de Marte talvez seja a grande diferença entre os terrenos do hemisfério norte e do hemisfério sul.

As terras altas do sul estão cheias de crateras o que significa que deve ser muito velha, enquanto a bacia do norte é, na sua maior parte plana e suave, logo deve ter sido completamente refeita há relativamente pouco tempo. Porquê?

Água, água, em todos os lugares

A questão mais importante para Marte é saber se tem água líquida.

A atmosfera é pouco espessa - a pressão à superfície é inferior a 1% da que existe ao nível do mar na Terra. Apesar de ser quase inteiramente, CO₂, gás de estufa, um tal cobertor atmosférico é tão fino que fornece apenas um pequeno efeito de estufa e assim Marte é muito frio.

Num dia de verão marciano no equador, a temperatura ao meio-dia pode-se aproximar de 0° C, mas a maior parte do planeta está bem abaixo dela durante a maior parte do ano, com os polos a atingir -140 °C. Ora, as condições marcianas estão abaixo do ponto triplo da água. Portanto qualquer água que exista encontra-se no estado gasoso ou no estado sólido. Se realmente os Canais de Lowell tivessem existido a água nunca teria fluído neles, mesmo que fosse extremamente salgada.

As fotografias com muito boa resolução revelam claramente grandes canais a correr para as planícies do norte e grandes redes de vales a talhar meandros pelo terreno acidentado das terras altas. Tal como na Terra. Mas apesar das semelhanças, existem algumas características muito pouco comuns nestas formações de Marte. Os vales são quase sempre encontrados nas montanhas do sul, logo deverão ser extremamente antigos. Podem-se visualizar afluentes a formar cursos maiores que começam a serpentear a jusante, eventualmente derramando-se em grandes planícies ou fluindo para crateras de impacto. Por exemplo, a enorme bacia de Hellas tem um sistema de vales associados, dispostos radialmente em torno dela como os raios de uma bicicleta. O que é muito estranho é que os afluentes não parecem crescer gradualmente como seria de esperar. Parece mais terem saltado para fora do solo. Logo os vales não foram alimentados pela água da chuva, como a maioria dos rios da Terra, mas formados por reservatórios de água subterrânea irrompendo à superfície.

Os canais de drenagem têm dimensões enormes, muito maiores que qualquer rio da Terra, com dezenas de quilómetros de diâmetro e comprimentos de centenas ou milhares de quilómetros, que se estendem desde as terras altas no hemisfério norte do planeta. E também surgem simplesmente do solo. E nascem em grandes áreas de terreno desordenado, algumas do tamanho da Suíça, como se a superfície tivesse simplesmente desabado sobre ela própria. Muitos destes canais de escoamento correm a partir de áreas ativas, tais como os grandes complexos de vulcão do bojo de Tharsis e pensa-se que se deram inundações avassaladoras repentinas provocadas por eventos geotérmicos. A maior parte da água de Marte pode ter sido armazenada na crosta, numa camada subterrânea de permafrost. Esta camada de gelo teria prendido a água líquida situada abaixo, gerando ao longo do tempo grandes pressões, até que um evento vulcânico criasse uma ruptura e surgisse um caudal de água fundida. Uma vez na superfície, o CO₂ dissolvido efervesceria instantaneamente da solução pois a pressão cairia abruptamente, fluindo de modo semelhante ao que

acontece quando desenvolvemos uma garrafa de champanhe. Também os impactos próximos podem ter quebrado o permafrost, libertando-se água em enormes caudais. No entanto essas inundações súbitas parecem ser demasiado inconstantes para a vida surgir. Mas há outros locais: bacias onde as redes de vales terminam; algumas crateras. E estas exibem anéis concêntricos de sedimentação, onde um lago poderia ter secado. Esses lagos de cratera de impacto podem até ter acabado em sistemas de aquecimento hidrotermal. O volume de água libertado ao longo dos canais de escoamento terá sido de tal ordem que teria impedido a sua solidificação rápida, mesmo sob as condições climáticas atuais. E terá ido tudo desaguar nas terras baixas do norte, a maior bacia de drenagem do planeta. Deve ter-se aqui formado um mar, que existiu durante algum tempo e, a seguir, afundou-se no solo ou sublimou para o ar. É o que alguns pesquisadores defendem, baseando-se nas evidências de linhas de costa de um grande oceano na bacia do norte. As planícies abaixo deste contorno são particularmente suaves, talvez mesmo uma cobertura de sedimentos que se estabeleceu sobre o fundo de um oceano. Dependendo das condições ambientais, a superfície desse mar poderia ter ficado repleta de grandes blocos de gelo à deriva ou solidificado quase até ao seu fundo ou (o que é provável, dado o volume de detritos que foram arrastados pelas cheias) originado um lago de lama espessa. A impressão geral, porém, é que um mar ali não teria sido possível durante a época dos canais de inundação. Quaisquer águas superficiais muito provavelmente, deveriam escapar para dentro da crosta ou escapariam para a atmosfera antes do próximo dilúvio chegar.

Evidência direta de água líquida

A existência das redes de vales, canais de drenagem e sedimentos das crateras podia ser explicado por processos não aquosos. Mas, em 2004 duas naves gêmeas aterraram na superfície de Marte e provaram mesmo ter existido água líquida.

Em 2004, a nave *Opportunity* aterrou numa planície no hemisfério norte, o *Meridiani Planum*, escolhida por conter um nível muito alto de um mineral de óxido de ferro, hematite. Muitos dos processos de formação da hematite exigem a presença de água líquida. Por pura sorte, a nave aterrou mesmo no meio de uma cratera de impacto, com o solo coberto de poeira fina escura, e cheio de misteriosas pepitas apelidadas de *blueberries* (amoras). Na parede da cratera estava rocha exposta exibindo um claro padrão de camadas de sedimentação - o sinal perfeito para procurar água líquida.

A rocha do chão da *Meridiani Planum* é, sem dúvida, sedimentar, aí colocada pelos mares rasos criados por inundações episódicas. Os detalhes químicos da rocha indicam que a água foi o líquido efetivamente envolvido e a temperaturas razoavelmente mornas, pelo menos, uns -10 °C. Mas deveria também ser muito

acídica devido à elevada composição num mineral de sulfato de potássio e ferro hidratado, jarosite, provavelmente devido a gases vulcânicos dissolvidos. Esta água acídica lixiviou sais do solo, tornando o mar muito salgado. Ao longo do tempo a água evaporou, deixando sais secos e poeiras através da planície. Mas debaixo do solo, a rocha permaneceu encharcada e os compostos de ferro precipitaram para produzir nódulos crescentes de hematite. Estes nódulos de hematite foram depois erodidos da rocha por tempestades de poeira e espalhadas pelo solo: são as blueberries observadas. Este ciclo de inundações e dessecações repetiu-se inúmeras vezes, tendo cada ciclo acrescentado mais uma camada fina de sedimento, até se formar um vasto bloco de 300 m de profundidade, tapando a paisagem craterizada situada por baixo. Estima-se que esta espessa placa sedimentar deverá ter demorado pelo menos 250 mil anos a acumular-se. O que é um período de tempo relativamente longo.

A evolução da vida em Marte

Como se pode ver pelas redes dos vales e o mar Meridiani Planum, Marte nos seus inícios era muito parecido com a nossa Terra primordial. E também recebeu durante o bombardeamento pesado enormes quantidades de substâncias voláteis e moléculas orgânicas preformadas. De facto, até pode ter recebido mais que a Terra pois estava mais perto da linha de neve. O que tornaria Marte, não a Terra, o mundo original de água no sistema solar interior. Marte contém todos os elementos necessários para a vida terrestre. Alguns, tal como o ferro, são mais comuns que na crosta terrestre (a cor do planeta vermelho deve-se a velhas planícies enferrujadas) enquanto outros, tal como o iodo e o potássio, são ligeiramente mais raros. O único elemento vital que está presente em Marte em quantidades apenas limitadas é o azoto. No entanto, o azoto presente nos materiais da superfície marciana está deslocado para o seu isótopo mais pesado, o que sugere que muito do gás original se perdeu com o resto da atmosfera. Logo é provável que o azoto não fosse escasso em Marte primordial, permitindo uma química pré-biótica. O vulcanismo estava presente nos dois jovens mundos, criando espessas atmosferas de CO₂ para isolar os planetas. Além disso a natureza redutora da atmosfera antiga de Marte terá permitido reações do tipo semelhante às de Urey-Miller, construindo blocos de construção orgânicos em piscinas superficiais. Sistemas hidrotermais poderão ter também existido em crateras de impacto e piscinas superficiais acima de pontos quentes de magma ou nos flancos encharcados dos grandes vulcões marcianos. Assim, em certos locais, Marte teve as condições básicas necessárias para haver vida: água líquida, química orgânica e uma fonte de energia.

Para já, o **Meridien Sea** é o único local de Marte onde se tem a certeza de que houve água no estado líquido. Ora, sejam ambientes salgados, acídicos ou frios, os extremófilos terrestres podem tolerar todas estas condições. Os escorrimentos de certas minas tais como o da bacia de Rio Tinto em Espanha, são igualmente acídicos e salgados mas contêm bactérias vivendo em minerais semelhantes àqueles que existem no **Meridien Sea**. No entanto, poucos organismos terrestres podem aguentar a extrema salinidade, acidez e frio simultaneamente. A questão mais difícil é se a dessecação e as condições hipersalinas criadas cada vez que o mar secou possibilitaram a sobrevivência. Não se sabe durante quanto tempo esteve o chão seco entre inundações mas as condições nestes intervalos devem ter sido muito duras em comparação com os tempos molhados. Algumas bactérias terrestres podem suportar dessecação de curta duração e os esporos envoltos em cristais de sal revelaram-se viáveis por milhões de anos, logo é admissível que as células marcianas tenham permanecido adormecidas até as inundações voltarem e a água absorvida no solo.

O que é duvidoso, contudo, é a evolução da vida ter ocorrido sempre nos períodos intermitentes molhados. Quando a vida se consegue estabelecer, consegue adaptar-se e espalhar-se para ambientes mais extremos mas os sistemas de química pré-biótica não se mantêm. Mas depósitos de sulfato, tais como as rochas sedimentares encontradas em Meridiani, são capazes de preservar moléculas orgânicas e os depósitos de rio Tinto contêm quantidades mínimas de fósseis de bactérias muito bem preservados. Ora, se a vida alguma vez existiu nestes mares rasos então, há uma boa possibilidade de encontrar evidências dela, mesmo passados Ganos.

Há quem acredite já ter encontrado provas de vida nos primórdios de Marte num meteorito. Há cerca de 15×10^6 anos atrás, um impacto que atingiu Marte ejetou um bocado de rocha para o espaço. Há 13 mil anos atrás, essa rocha caiu na Antártida. Em 1984 foi recolhida por cientistas. Foi o primeiro desse ano e assim foi catalogado como ALH84001. Uma década mais tarde, a rocha foi identificada como um pedaço de Marte. A partir daí o meteorito foi examinado exaustivamente; os estudos levaram um grupo de pesquisadores a afirmar que tinham descoberto vida marciana dentro da rocha. O grupo citou várias peças de evidências que apontam para a ação biológica: em primeiro lugar, os glóbulos de minerais em camadas encontradas dentro do ALH84001 são semelhantes às produzidas por bactérias terrestres; em segundo lugar, uma grande variedade de moléculas orgânicas foram encontrados dentro dele, incluindo PAH (estas moléculas formam-se em nuvens de poeira interestelares). O grupo argumentou que estes PAH são muito diferentes dos tipos encontrados no interior da rocha e que a sua PAH não são uma contaminação desde que o meteorito

caiu na Terra. PAH não são produzidos pelo metabolismo terrestre, mas são formados pela decomposição orgânica de matéria. São comuns no petróleo bruto, por exemplo, onde são formados pela degradação da clorofila de organismos fotossintéticos antigos. Assim, é possível que o PAH na ALH84001 represente restos em decomposição de bichos de Marte. Finalmente, imagens ao microscópio do interior do meteorito forneceram outra sugestão de vida. Segmentos de formas alongadas são considerados restos fossilizados de micróbios marcianos. No entanto, essas estruturas são pequenas, com algumas dezenas de nanômetros de diâmetro, mais ou menos o tamanho de um vírus e centenas de vezes mais pequenas que os mais pequenos fósseis de bactérias terrestres. É incerto se todo o mecanismo básico de vida, tal como um polímero genético e enzimas, pode ser enfiado num saco tão pequeno. No entanto, não se sabe bem qual é o limite inferior de tamanho na vida. A mais pequena bactéria aceite tem cerca de 300 nm de diâmetro, e células ainda mais pequenas foram sugeridas em rochas terrestres e consideradas causadoras de doenças cardíacas. A crítica geral contra as evidências de vida existentes no ALH84001 é que nenhuma das características são inequivocamente biológicas podendo ter sido produzidos por processos abióticos. Ainda há debate à volta do ALH84001, mas com menos entusiasmo. Muitos cientistas ainda acreditam na possibilidade antiga e atual de haver vida em Marte. E pensam que este pequeno meteorito não é uma prova convincente.

Colapso ambiental

As redes de vales e o *Meridiani Planum* datam mais ou menos do mesmo tempo na história marciana e ambos seriam impossíveis nas condições atuais. Indicam que, em tempos, Marte tinha condições para ser mais húmido e quente. Pensa-se que por volta de 3,5 Ga atrás aconteceu algo muito drástico que vitimou o ambiente marciano, e as condições devem ter ficado provavelmente muito parecidas com as que vemos hoje num deserto árido frio. O colapso ambiental catastrófico que ocorreu parece estar ligado à perda da sua atmosfera.

Em tempos primordiais, logo após a formação de Marte e da Terra, acredita-se que estes estivessem envoltos em ambientes semelhantes. O CH₄, CO₂ e vapor de água teriam fornecido um efeito de estufa apreciável, isolando os jovens planetas. E a elevada pressão com temperatura amena permitiu a ação a longo prazo de água líquida de que se vê sinais por toda a superfície marciana. Para alcançar as condições que permitem a existência de água líquida, Marte provavelmente teria precisado de uma atmosfera várias vezes mais espessa do que a cobertura terrestre atual; está mais longe do Sol que a Terra e, naqueles primeiros dias, o Sol também era cerca de

25% menos brilhante. Grande parte desta atmosfera teria sido ejetada para fora pelos enormes vulcões marcianos, acionados pelo calor armazenado dentro do planeta. Mesmo em tempos posteriores, cada uma das erupções que provocaram inundações poderia ter libertado na atmosfera CO₂ suficiente para um ligeiro aumento do efeito de estufa, fornecendo um breve período de condições mais quentes. Mas, a reserva de calor dentro de Marte e a atividade vulcânica foram diminuindo de forma constante ao longo do tempo. O planeta foi morrendo por dentro e as erupções tornaram-se cada vez menos frequentes.

E os processos que provocaram essa diminuição continuaram ininterruptamente. Grandes impactos atiraram ar para o espaço, moléculas de gás muito rápidas escaparam à atração gravitacional do planeta e o vento solar gradualmente levou a atmosfera superior. Embora algum do gás tivesse reagido com a crosta evitando ser levado para o espaço, a existência de uma maior abundância de isótopos de nitrogénio pesados infere que uma grande proporção deste gás se perdeu. Com a erosão da atmosfera, a pressão e a temperatura da superfície caíram a pique e a era dos rios e lagos chegou ao fim.

Ora, parece que, em muitos aspetos, esse destino era inevitável. Marte é menor que a Terra, apenas com 1/10 da sua massa. Isto revelou-se desastroso para o seu ambiente de três formas. Primeiro, Marte tem um poder gravitacional muito mais fraco sobre as moléculas de gás da sua atmosfera e assim elas se escapam mais rapidamente. Segundo, perde calor mais rapidamente. Embora haja alguma evidência de atividade vulcânica recente no Olympus Mons, para todos os efeitos, a superfície marciana está ali geotermicamente morta e a atmosfera deixou de ser reabastecida há muito tempo. Prevê-se que o nosso próprio planeta sofrerá este mesmo destino dentro de, talvez, um Gano. Terceiro, Marte não tem um campo magnético; embora o tenha tido nos seus inícios por algum motivo deixou de existir quase imediatamente deixando o ambiente desprotegido e à mercê do vento solar.

Quanto á água de Marte não se sabe muito bem o que aconteceu. O volume de gelo visível nas calotas polares equivale a uma camada de água de algumas dezenas de metros de profundidade se uniformemente distribuída por toda a superfície mas uma estimativa mínima da quantidade necessária para preencher os canais de drenagem é várias vezes maior. Para onde foi tanta água? A esperança é que muito dela se encontre no subsolo, formando uma camada de permafrost com muitos quilómetros de espessura. Mesmo que a evidência de um oceano no norte não se mantenha, talvez porque as condições na época eram muito frias, um grande volume de água da

inundação teria embebido o solo. As terras altas do sul, onde a maioria dos canais de escoamento se originam, também pode ter muita quantidade de água no subsolo.

Pensa-se que a profundidade de topo deste permafrost seja de algumas centenas de metros abaixo da superfície, mas encontra-se a uma maior profundidade à volta do equador, onde as temperaturas maiores podem causar maior sublimação. Nalguns lugares, há sinais de ter escorrido água no estado líquido por toda a superfície em tempos recentes. Isto demonstra que existe água sob a superfície de Marte e a atividade geotérmica local funde bolsas dela perto da superfície mesmo hoje em dia.

Sobrevivência

Pensa-se que o colapso foi bastante gradual tendo dado aos organismos da superfície tempo evolutivo suficiente para se adaptar. No entanto, embora comunidades endolíticas (como aquelas dos vales secos da Antártida) possam ter-se mantido por algum tempo enquanto o ambiente à sua volta colapsava, teriam a seguir certamente sucumbido à extrema dessecação, frio e raios UV. Talvez um dia se possa encontrar os seus restos fossilizados ou descobrir moléculas orgânicas em decomposição.

A procura de vida em Marte já se iniciou em 1976 com as sondas Viking. Estas carregavam um laboratório miniaturizado que incluía um conjunto de experiências concebidas para detetar sinais de atividade biológica.

A primeira experiência consistia em misturar uma amostra do solo com CO₂ e CO, e em alguns casos também com água. O carbono dos óxidos continha um isótopo radioativo (¹⁴C). Depois de um curto período de tempo, o solo foi aquecido para expulsar as substâncias voláteis; animadoramente o carbono radioativo estava entre elas. Isto significa que o CO₂ se deve ter incorporado em algo no solo, do mesmo modo que a vida terrestre fixa carbono inorgânico por foto ou quimiossíntese.

Na segunda experiência alimentou-se outra amostra do solo com um caldo nutritivo radioactivamente marcado com moléculas orgânicas; gás radioativo libertou-se do solo, exatamente como se a vida tivesse a metabolizar. No teste final colocou-se no solo um conjunto de blocos de construção, tais como açúcares, aminoácidos e bases nucleotídicas e esperou-se para ver que gases eram libertados. Quase imediatamente, o oxigénio vazou para fora, como se células dormentes tivessem sido acordadas pelo calor e humidade e começassem a fotossíntese. Mas a libertação diminuiu à medida que mais água foi adicionada, ao contrário do que aconteceria com células em crescimento, e o mesmo aconteceu no escuro. Esta experiência, e a primeira, também deram resultados positivos mesmo quando o solo havia sido pré-aquecido a temperaturas que destruiriam qualquer célula terrestre. A euforia inicial dos pesquisadores da Viking rapidamente virou-se para uma confusa decepção. O golpe

final chegou quando algum solo foi aquecido com uma substância química aspiradora. Quaisquer moléculas orgânicas complexas no solo se decompõem noutras mais simples que evaporam e podem ser identificadas. Mas o instrumento não conseguiu detetar até mesmo um sopro de qualquer coisa orgânica, nem mesmo os produtos de degradação de células mortas. Logo não poderia haver organismos. Mas mesmo sem vida, era de esperar encontrar um certo nível de substâncias orgânicas, devido à queda de cometas e meteoritos ao longo da história marciana, só que o solo também se revelou totalmente destituído disto. O que foi testado no solo foi a realização de reações químicas que na Terra sugeririam vida.

E porque não há vestígios de substâncias orgânicas na superfície? A fina atmosfera marciana, desprovida de O_3 ou outros filtros, não oferece praticamente nenhuma proteção contra a radiação UV vinda do Sol. Esta radiação penetra no solo e cria substâncias altamente reativas, incluindo superóxidos e outros radicais livres, e oxidantes poderosos, como H_2O_2 . Isto rapidamente quebra e destrói todas as moléculas orgânicas presentes no solo; é como se a superfície de Marte fosse atacada com lixívia. Quando as experiências Viking adicionaram água ou nutrientes, eles também foram separados pelos oxidantes para libertar o oxigénio e outros gases detetados. Mas as experiências Viking estão muito longe de ser a palavra final sobre a vida marciana - só indicaram não haver vida nesses dois locais. Os instrumentos de análise química também determinaram que as substâncias orgânicas não poderiam estar presente em mais do que algumas ppb. Mas essa sensibilidade ainda detetaria células, mesmo se existissem vários milhões de bactérias por grama de solo (mais ou menos a densidade encontrada nas comunidades de basalto profundas na Terra).

As hostis condições marcianas provavelmente impedem a existência de qualquer forma de vida na superfície. Acredita-se que os raios UV e as substâncias químicas que geram tenham esterilizado completamente o solo. Até que ponto essa região oxidada se estende não se conhece, mas pode ir a vários metros de profundidade, pois o solo é continuamente misturado pelos ventos. A próxima geração de sondas deve poder fazer perfurações abaixo desta camada letal para ter qualquer esperança de encontrar sinais de vida. Tanto como a deteção da presença de quaisquer substâncias orgânicas, os cientistas estão ansiosos para saber se elas foram biologicamente produzidas. As sondas futuras vão procurar duas bioassinaturas: quiralidade e isótopos.

E no subsolo poderia alguma vida sobreviver? As matérias-primas para uma vida quimioautotrófica são a rocha basáltica imersa na água líquida contendo CO_2 dissolvido. Os minerais vulcânicos na rocha são ricos em ferro altamente redutor que reage com a água para produzir hidrogénio, um combustível que as células usam tanto

para fixar carbono como para obter energia para poderem realizar as suas reações redox. Supõe-se que a rocha basáltica é comum na crosta marciana, mas o que acontece com a água líquida? A camada de permafrost fortemente congelada abaixo da superfície não é ambiente para as células ativas, mas este reservatório pode-se estender muito profundamente. Pensa-se que a crosta marciana é quebradiça e porosa a profundidades significativas, devido aos embates recebidos durante o bombardeamento pesado. Os cálculos mostram que esta espécie de esponja global poderia segurar uma enorme quantidade de água, o suficiente para criar um oceano com 1 km de profundidade se fosse espalhado uniformemente pela superfície, mas não se sabe o quanto dessa esponja está embebida. Se o volume estimado de água que formou os canais de escoamento e as suas fontes nas montanhas do sul permanecer subterrâneo, então esta camada de permafrost é de cerca de 2 km de espessura no equador e 6 km no polos. A estas profundidades maiores, o calor interior do planeta torna-se significativo e poderá ter derretido o fundo da camada de gelo obtendo-se águas subterrâneas lamacentas, parcialmente congeladas, ou mesmo um aquífero líquido salgado. Bolsas locais de água líquida podem até estar muito mais próximas da superfície nas áreas vulcânicas que são conhecidos por terem sido ativas nos últimos tempos. A saliência da região de Tharsis foi formada por um afloramento massivo de magma e pode constituir uma tal fonte de calor relativamente perto da superfície. Reservatórios de água salgada dariam nichos semelhantes aos bolsões naturais de água aprisionada dentro de gelo da Antártida, habitada por psicrohalófilos. A vida em Marte pode não formar um ecossistema abrangendo todo o planeta, como na Terra, mas poder ser persistente em refúgios isolados, onde o calor geotérmico local funda o permafrost e lixivia nutrientes para fora da rocha. Sendo os organismos marcianos muito raros e centrados em poucos oásis no subsolo torna-se difícil saber onde os procurar. No entanto, podemos já ter encontrado sinais de sua existência.

Os quimioautotróficos que vivem nos aquíferos basálticos profundos fazem reagir H_2 e CO_2 para produzir metano, CH_4 . Mas na Terra, a libertação deste gás residual nunca poderia ser usado para detetar ecossistemas profundos, porque inúmeros processos biológicos à superfície também produzem CH_4 (incluindo as hordas de bactérias habitando os nossos intestinos). Isto não é verdade para Marte, por isso é possível que emissões localizadas de CH_4 possam ser detetadas no ar. Uma das sondas que orbitam o planeta, *Mars Express*, tem, de facto, encontrado leves traços de CH_4 na sua atmosfera. Ora, este gás poderá ter sido lançado por pequenos episódios vulcânicos ou talvez pelo impacto de um cometa que o contenha, mas também pode ter sido produzido por bactérias. O CH_4 é destruído pelos raios UV solares e pode bastar

apenas alguns séculos para ser completamente removido da atmosfera, assim seja quem for que o tenha libertado fê-lo muito recentemente e está, provavelmente, ainda ativo. Os instrumentos atualmente apontados para Marte são pouco sensíveis para detetar o CH₄ nem conseguem detetar com precisão de onde ele provém, mas nos próximos anos, já deveremos ser capazes de detetar as plumas de CH₄ à medida que sobem para a atmosfera e localizar a sua origem. Em princípio, também deverá ser possível demonstrar se o CH₄ possui uma origem biológica. Basta verificar se os átomos de carbono presentes no CH₄ estão enriquecidos no isótopo mais leve, ¹²C.

A água dentro de fendas e fissuras debaixo da camada de permafrost é capaz de ser ácida, por causa de gases vulcânicos dissolvidos, mas salgada o suficiente para permanecer líquida apesar do frio. Em teoria, SLiMEs até poderão estar escondidos nas profundezas do solo marciano em aquíferos na parte inferior da camada de permafrost. Podemos até ser capazes de fixar um ponto nas suas localizações sob a superfície das plumas reveladoras de gases residuais. A boa notícia é que nós não necessitaremos de perfurar quilómetros de rocha sólida para começar a procurar vida subterrânea. Os canais antigos de escoamento foram formados quando pontos quentes geotérmicos derreteram a casca de permafrost para desencadear dilúvios cataclísmicos de água; há sinais de ter havido, em muitos eventos de menor escala, irrompimento de água líquida para a superfície em tempos recentes. Nestes casos, a água pode ter solidificado mas não sublimado por causa de finas camadas de poeiras e cinzas vulcânicas que lhes possam ter caído em cima. Assim há a esperança de encontrar células subterrâneas, transportadas durante as irrupções de água, preservadas no interior desses gelos. Podem até estar dormentes e, desde logo, ser recuperadas numa missão de retorno de amostras e reavivadas num laboratório na Terra. Apesar da superfície de Marte estar sob a ação da radiação solar e cósmica, é possível, se o tempo que passou não for demasiado, que ainda mantenham o seu DNA e proteínas em bom estado. Assim, torna-se necessário enviar novas sondas especificamente construídas e preparadas para investigar a presença de Vida, ou uma missão tripulada.

Mas Marte não é de nenhuma maneira o único habitat possível no sistema solar.

2.3.4. Asteroides

Entre Marte e Júpiter, de 1,5 UA a 5,2 UA, há cerca de 700 mil objetos. Mas poucos relativamente aos inicialmente existentes. Só quatro deles atingem dimensões entre 500 km e 1000 km. A sua massa total reunida só chega a 4% da massa da Lua e cerca de um terço está contida num só, Ceres, classificado como planeta anão. E

considerando os quatro primeiros, Ceres, Vesta, Pallas e Hygé, então temos reunida mais de metade da massa dos asteroides. Tudo isto significa que são muito pequenos em massa e tamanho, logo não conseguem ter uma atmosfera. Como se encontram longe do Sol não recebem energia necessária para terem qualquer tipo de atividade por tempo suficiente para o desenvolvimento de vida.

Quanto à sua composição podem classificar-se os asteroides nos tipos: C, ou carbonáceos (cerca de 75%) ricos em carbono, orgânicos e silicatos hidratados; S, silicatados (cerca de 25%) ricos em metais e silicatos; M, metálicos (cerca de 10%) ricos em metais. Mas há outros tipos menos frequentes: D, ricos em carbono, silicatos e orgânicos; B, P, etc... . A distribuição dos asteroides a partir do Sol reflete a formação dos planetas. Os tipos S e M dominam a



Fig.10 Estrutura interna de Ceres com um oceano líquido. Fonte: retirado da net

cintura principal e o sistema solar interior enquanto os tipos C, P e D dominam do lado de fora da cintura principal. Em particular, a abundância dos do tipo D, aumenta a partir da 4 UA em diante. Importantes para a vida são obviamente os dos tipos C, B, D e P onde estão presentes o carbono e orgânicos. Todos estes tipos poderão ter alimentado a Terra com orgânicos e moléculas pré-bióticas. No entanto alguns dos do tipo M têm minerais hidratados. E poderão ter contribuído para alimentar a Terra de água. Além disso na composição destes corpos há pelo menos 10% de água em massa.

No entanto, há que notar que já foram descobertas algumas moléculas orgânicas complexas em alguns dos asteroides. Alguns meteoritos encontrados na Terra apresentam evidências que apontam para a possibilidade dos corpos que os originaram poderem ter possuído água líquida. Põe-se até a possibilidade de alguns destes pequenos corpos terem desenvolvido vida primitiva num passado distante e, quem sabe, terem contaminado a Terra.

Além disso, o maior dos asteroides poderá ter massa e tamanho, suficientes para ser diferenciado. É praticamente esférico, muito diferente dos outros corpos da Cintura e supõe-se ter permanecido intacto desde a sua formação no início do Sistema Solar. Os minerais dominantes à superfície deste astro são argilas hidratadas - uma prova inequívoca de já ter tido água líquida, pelo menos nalgum momento do passado.

Ceres tem muita água. Se tiver um oceano líquido pode ter fontes hidrotermais e à volta dessas pode haver seres vivos. Contudo não é muito claro como é que se podem manter oceanos líquidos deste modo pois não parece provável que haja atividade tectónica significativa (pois tem uma massa demasiado pequena para sustentar um núcleo fundido a longo prazo) e não se encontra a girar à volta de um corpo perturbador por marés (tal como Europa à volta de Júpiter). Por ter pouca massa a sua velocidade de escape é tão pequena que alguns fragmentos de Ceres podem ter sido atirados para o espaço com mais regularidade que de outros planetas como Marte. E se esses fragmentos abrigaram micróbios então Ceres passa a ser o primeiro candidato a ter semeado a vida na Terra. Além disso, não tendo sido muito afetado durante o bombardeamento pesado tardio, manteve a sua água de superfície.

A existir vida é muito mais provável situar-se abaixo da superfície. Põe-se a hipótese de ser baseada no peróxido de hidrogénio, H_2O_2 , e que é capaz de se manter a baixas temperaturas. Mas ainda não se detetou esta substância neste corpo celeste.

Mas há ainda muitas dúvidas à possibilidade de Ceres ser mesmo um lugar hospitaleiro para a vida.

Outro asteroide, Vesta, também apresenta sinais de minerais hidratados. Também está completamente diferenciado com uma camada de basalto na sua superfície diferenciada e também é demasiado diferente dos outros asteroides sendo reclassificado recentemente pela IAU como protoplaneta. Sabe-se ter havido uma colisão com este corpo celeste que se deu entre 1 Ganos e 2 Ganos atrás e alguns dos detritos vieram parar à Terra na forma de meteoritos que e ainda continuam a cair, pois cerca de 6% de todos os meteoritos que caem na Terra são provenientes deste asteroide. Um deles foi descoberto por um português. O estudo de Vesta pode dar ideias de como se deu a libertação de materiais hidratados no sistema solar interior.

2.3.5. As luas de Júpiter

Júpiter é o maior planeta do Sistema Solar em tamanho e em massa. É um planeta gigante em todos os aspetos. Tem quase um milésimo da massa do Sol mas mais do dobro da massa conjunta de todos os outros planetas e os outros corpos menores - 71%. E tem um cortejo de satélites e anéis à sua volta. Porém estes últimos não se veem pois refletem muito pouco da luz que recebem do Sol.

O sistema de satélites ou luas de Júpiter tem até agora, 63 objetos, que giram em volta dele. Muito parecido com um sistema solar em miniatura, com Júpiter no meio a

fazer de Sol. Destes, distinguem-se claramente os 4 descobertos por Galileu, os satélites galileanos. A tabela seguinte mostra as características físicas e orbitais deles.

Parâmetros e propriedades	Io	Europa	Ganimesdes	Calisto
Distância média a Júpiter (em 10^3 km)	422	671	1070	1880
Distância média a Júpiter (em $r_{\text{Júpiter}}$)	5,9	9,4	15	26
Período orbital (em dias)	1,77	3,55	7,15	16,7
Diâmetro (em km)	3644	3122	5262	4820
Massa (em $m_{\text{Júpiter}}$)	0,0047%	0,0026%	0,0078%	0,0056%
Massa (em unidades 10^{22} kg)	8,93	4,80	14,82	10,76
Densidade relativa	3,53	3,01	1,94	1,83
Temperatura média à superfície (em °C)	-143	-150	-163	-139
Albedo geométrico	0,62	0,68	0,44	0,19
Massa (em m_{Lua})	1,22	0,65	2,02	1,46
Diâmetro (em d_{Lua})	1,05	0,90	1,51	1,39
Densidade relativa (em d_{Lua})	1,06	0,90	0,58	0,55

Há 3 fontes de energia com origem neste planeta. Júpiter, pelo facto de se encontrar a uma determinada temperatura acima do zero absoluto, mais exactamente 165 K, emite radiação térmica. Esta emissão é tanto maior quanto maior for essa temperatura. Assim, o Sol com os seus 5780 K superficiais emite incomparavelmente muito mais energia que Júpiter.

Sabe-se também que Júpiter ainda se encontra em contração, logo a energia potencial gravitacional diminui. Então a energia em falta tem que aparecer noutra forma ou formas. Uma delas é a calorífica pois Júpiter aquece por dentro, mas não sendo Júpiter um sistema isolado, parte dela escapa para o espaço, atingindo as suas luas. Ora, esta contração é muito lenta, e vai continuar durante muito tempo até se atingir o equilíbrio.

No entanto há outro mecanismo bem mais importante de transferir energia em jogo: o efeito de maré. À medida que as luas orbitam em torno de Júpiter vão sofrendo compressões e distensões sucessivas. E é mais importante devido à elevada massa de Júpiter e à proximidade destas luas. E as forças atrativas exercidas pelas luas umas nas outras estão sempre a variar. Assim, as luas sujeitas ao efeito de maré possuem uma fonte de energia considerável, aquecem e esse aquecimento pode ser bastante significativo (Yun, 2011, p. 99-104).

Io é o corpo com o vulcanismo mais ativo de todo o sistema solar. O seu interior encontra-se praticamente todo derretido e os inúmeros vulcões produzidos vão expelindo para fora nuvens de enxofre e SO_2 que são lançadas a mais de 300 km de

altitude e uma pequenina parte vai mesmo parar a Europa enriquecendo-a deste elemento. O seu núcleo é de ferro puro. Na sua superfície globalmente gelada não há crateras, um sinal claro de que é geologicamente jovem. E é a única lua do sistema solar exterior que é rochosa, portanto, livre de gelo de água. As marés causam naturalmente fraturas na crosta de Io. Mas não há tectónica de placas. No interior a temperatura deve ser muito elevada e não deve haver água.

Io não possui material orgânico à superfície nem no interior. Não há CHNOPS nem água líquida. Há energia. Só que tanta que acaba por impedir que se desenvolva vida.

O segundo satélite chama-se Europa e é o segundo astro do sistema solar com mais interesse astrobiológico.

2.3.5.1. EUROPA

Existem várias evidências de que exista um oceano de água líquida no interior de Europa. Este oceano encontra-se escondido por baixo de uma crosta de gelo com cerca de 10 a 30 km de espessura. E porque é que está líquido?

Devido a duas fontes: uma é constituída pelos elementos radioativos existentes na parte rochosa de Europa e que se estão a desintegrar continuamente libertando calor; outra, a mais importante e decisiva é o já referido efeito de maré que Júpiter produz nesta lua e que é suficientemente intenso para fornecer o aquecimento necessário para manter líquida a camada de água durante todo o tempo de existência do sistema solar. Além disso há evidências de esse oceano ter sais dissolvidos.

De facto, a densidade de Europa aponta para um interior rochoso rodeado de líquido: se a maior parte fosse gelo a densidade nunca poderia ser tão grande. O contacto do líquido com rocha em vez de gelo é importante pois permite o fornecimento de outros elementos essenciais à vida em quantidades vestigiais (absolutamente necessárias).

As fotos enviadas pela sonda Galileo revelam uma superfície gelada, quase perfeitamente esférica, com pouco relevo e poucas crateras. Ora os satélites Ganimedes e Calisto que se encontram na mesma área têm muitas mais crateras. Ora a frequência de embates foi a mesma devendo resultar iguais densidade de crateras (ou um pouco maior). A única forma de explicar a ausência de crateras e o pouco relevo é a superfície ter tido muito menos tempo que as outras para haver mais colisões. Logo é uma superfície jovem, reconstituindo-se após sofrer cada embate.

Algumas estruturas que se vêem à superfície só são facilmente explicadas supondo uma camada de gelo em cima de um oceano de água líquida. E a existência de sais

hidratados à superfície (McCord et al.,1998) sustentam a ideia de ter havido e provavelmente ainda haver permutas entre esse oceano interno e a crosta gelada.

Esta lua tem um campo magnético. A periodicidade desse campo é igual à do movimento de Europa em torno de Júpiter. Então é provável que seja produzido por correntes elétricas induzidas por esse movimento. Assim, deve haver um fluido condutor compatível com a água líquida cobrindo todo o satélite com uma salinidade semelhante à existente nos oceanos terrestres.

Quais as perspectivas para a existência de Vida em Europa?

Dos três critérios indicados no início deste capítulo para poder existir vida, dois parecem estar satisfeitos. A fonte de energia é o problema (Yun, 2011, p. 104). O Sol está muito longe e a sua luz não penetra nos quilômetros de gelo superficial. Quanto à energia da maré esta não pode ser utilizada, pois o aquecimento do oceano interno é razoavelmente exotérmico (temperatura igual em todo o oceano). No entanto ainda há possibilidades de existirem fontes termais de água muito quente no fundo do oceano (á semelhança do que se passa no fundo dos oceanos da Terra) ou a energia química de dissolução de algumas substâncias no fundo do oceano. Ou ainda a energia produzida na reação de algum oxigénio libertado no embate de partículas de alta energia com o gelo. Mas em qualquer dos casos a quantidade de energia disponível é reduzida, pelo que nos oceanos de Europa não é de esperar a existência de uma biomassa rica ou de organismos complexos como os que estão presentes nos oceanos terrestres.

Mas para ter certeza há que ir lá observar, experimentar. Deste modo existem planos para enviar uma sonda que possa confirmar a existência do oceano em Europa. A confirmação será inicialmente indireta, através da utilização de um altímetro. É que, se parte do interior de Europa for constituída por água líquida, a intensa força de maré de Júpiter provoca uma deformação (subida e descida da superfície) que se calcula ser de trinta metros. Pelo contrário, se o interior for de gelo sólido, essa deformação é apenas de um metro. Outra forma de verificar é usar radar capaz de penetrar o gelo e revelar a presença de uma interface entre a água líquida e gelo sólido.

Caso se confirme a presença de oceano, existem planos para se enviar uma nova sonda que pouse nesse satélite e perfure o gelo até chegar ao tal oceano e faça uma busca dos sinais de vida nas águas por baixo do gelo. No entanto, a tarefa não se afigura fácil: a temperaturas tão baixas (-150 °C) o gelo é extremamente duro e rígido e a sua espessura terá no mínimo, 10 km. Para terminar, boas notícias recentes: Europa tem tectónica de placas (Wall, 2014, Space.com).

2.3.5.2. O gigante Ganimedes e o imprevisível Calisto

Ganimedes é uma lua completamente diferenciada que parece ter um oceano de água líquida no seu interior mas a uma profundidade maior que Europa. Este encontra-se entre uma camada de gelo e uma camada de silicatos.

Ganimedes tem aproximadamente as mesmas quantidades de rocha silicatada e gelo de água o que explica a sua densidade. Possui um campo magnético como resultado da convecção no seu núcleo líquido de ferro ou Fe-S. Um terço da sua superfície são zonas escuras altamente craterizadas e antigas (idade média de 3,5 Ganos) e os outros dois terços são zonas claras mais recentes cortadas por uma rede complexa de cristas e fossas, resultantes de processos tectónicos provocados pelas forças de maré. Estará essa tectónica ainda hoje ativa? Há uma atmosfera ténue muito rarefeita que contém algum oxigénio e até ozono. Na superfície têm sido identificados vários materiais além de gelo de água tais como, CO₂, SO₂ e vários compostos orgânicos provavelmente formados no local, por radiólise do gelo o que é comprovado pela deteção de oxigénio gasoso que se forma por este processo.

Ganimedes possui energia de maré, água líquida no interior e compostos orgânicos e estando a água líquida em contacto com a camada silicatada há acesso a alguns elementos vestigiais completamente necessários à vida. Assim é possível que existam no seu interior seres extremófilos habituados a altas pressões e altas temperaturas.

Convém também referir que Ganimedes é um protótipo para entender muitos dos processos que atuam nos satélites gelados do sistema solar e de todos os outros sistema estelares espalhados pela galáxia, ou seja, é um protótipo dos chamados “mundos de água” que se pensa serem mais abundantes no Universo do que os mundos terrestres e que são também elegíveis para abrigarem vida.

Calisto tem a superfície mais craterizada do sistema solar. Logo é muito velha com idade estimada em mais de 4 Ganos. Logo não deverá haver atividade tectónica há muito tempo.

Alguns anos atrás pensava-se que esta lua consistia numa mistura mais ou menos homogénea de rochas e gelo. Os dados da Galileo permitiram alterar esta situação. Calisto possui uma camada condutora no seu interior que desvia as linhas do campo magnético de Saturno e que é consistente com a ideia de um oceano salgado.

Assim, a crosta desta lua é uma camada de gelo de água com 200 km de espessura, possivelmente “flutuando” sobre um oceano de água “salgada” com 10 km de espessura. Abaixo deste oceano encontra-se uma mistura de gelo, rochas silicatadas e metais (ferro e níquel) que se diferenciara por gravidade com a profundidade, mas de modo contínuo, com aumento do teor da rocha e diminuição do teor de gelo.

Quanto à possibilidade de haver vida as condições são muito menos favoráveis nesta lua do que nas outras duas. Deve haver compostos orgânicos em abundância e água líquida mas é deficitário no terceiro vértice, a energia. Estando mais afastada de Júpiter logo é o menos afetado pelas forças de maré, apesar da excentricidade ser 36 vezes maior nesta lua do que em Europa. A energia solar não afeta o interior. Só resta mesmo o calor libertado pela desintegração radioativa para aquecer. E na zona de contato do oceano com o que está por baixo pode haver silicatos suficientes para se criarem montanhas hidrotermais tal como existem nas profundidades oceânicas da Terra. Mas podem acontecer mais surpresas. A maltratada superfície de Calisto parece que esconde muitos segredos.

2.3.6. Saturno - a joia do Sistema Solar

Saturno. Segundo maior planeta do Sistema Solar em tamanho e massa. Mas com os seus anéis é de longe o mais belo. Tem 1/3 da massa de Júpiter. Mas a sua densidade é inferior à da água. E tem um cortejo de satélites naturais - 62 - a girar à sua volta. E estes recebem menos luz do que as de Júpiter (cerca de 4 vezes menos concentrada) e a temperatura é, por conseguinte, menor. Saturno está a 9,6 UA do Sol e em ressonância 5:2, com Júpiter.

Saturno emite mais energia para o espaço do que aquela que recebe do Sol. Cerca de 2,5 vezes. A maior parte dessa energia é libertada porque Saturno está ainda a contrair-se muito lentamente. Mas a quantidade que se liberta não é explicável só por isto e então tem de haver outro mecanismo a funcionar. De facto pensa-se que o hélio se está a fundar no interior de Saturno gerando calor por fricção.

Saturno tem também um poderoso campo magnético mas que é inferior ao de Júpiter. Saturno, também exerce forças de maré enormes sobre os seus satélites aquecendo-os por dentro. De entre essas luas destacam-se duas; Titã e Enceladus.

2.3.6.1. Titã, uma fábrica química de produtos orgânicos

Titã é, em tamanho, a segunda lua do sistema solar. É maior que Mercúrio mas com muito menos massa. Merece no entanto ficar, de longe, em primeiro lugar, pelas perspectivas que abre à Vida no Universo.

De facto é o único corpo do sistema solar a ter líquidos na sua superfície tirando a Terra. Só que esse líquido é metano. Que na Terra é um gás. E a água que na Terra é líquida, em Titã é rocha dura, construindo as suas montanhas. Mas há mais surpresas: há nuvens, rios, mares, o vento sopra nos montes, cai neve e tudo isto se passa em

versão “metano”, na semiobscuridade de cor alaranjada pois a luz é muito mais fraca que na Terra e a atmosfera não deixa passar a maior parte da luz visível.

A atmosfera é mais espessa que a da Terra sendo a pressão superficial 1,5 vezes a existente á superfície da Terra ao nível do mar. E a sua estrutura quase se poderia decalcar da estrutura da atmosfera terrestre mas dilatando-a em altitude. É quase só azoto (95%), com 4,9% de CH_4 , 0,2% de hidrogénio e traços de árgon, CO e de muitos compostos orgânicos, por exemplo, C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_2 e o ácido cianídrico, HCN. Um verdadeiro cocktail orgânico, onde não há O_2 nem CO_2 . A temperatura é muito baixa (94 K, ou seja, -179°C). Nas condições de pressão e temperatura existentes em Titã, o metano pode coexistir nas três fases, sólida, líquida e gasosa (tal como a água na Terra) (ver fig. 11). Há um ciclo metanológico tal como na Terra há um ciclo hidrológico. Os lagos que já foram detetados surgem com mais frequência nos polos e contêm não só CH_4 mas C_2H_6 . E nas altas camadas da atmosfera os UV do Sol quebram as moléculas de CH_4 , desencadeando um conjunto muito complexo de reações químicas que resultam num conjunto enorme de substâncias orgânicas que vão encher essa atmosfera e a superfície de moléculas com papéis de grande relevância para a Vida (Yun, 2011, p. 105-108). De facto, a atmosfera de Titã contém aerossóis de moléculas orgânicas enquanto à sua superfície podem acumular-se hidrocarbonetos em lagos e rios com capacidade para corroerem a água gelada, contribuindo para a dinâmica geológica.

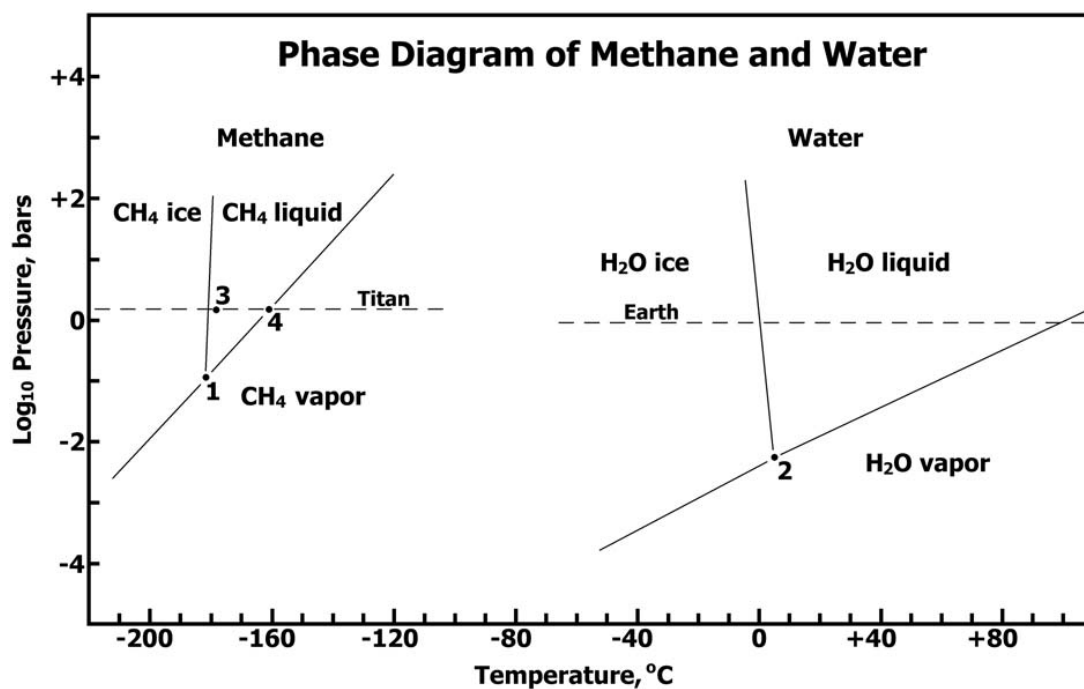


Fig. 11 Diagrama de fases do metano e da água que permite compreender por que razão o metano pode existir nas três estados físicos em Titã. As condições de pressão e temperatura são próximas do ponto triplo do metano.

Fonte: Introduction to Planetary Science, Gunter Faure e Teresa M. Mensing, Springer 2007

Perante tal cenário, Titã torna-se um dos locais importantes para o estudo de processos químicos que poderiam estar presentes no aparecimento de Vida na Terra primordial. Por essa razão, em 2005, a Agência Espacial Europeia (ESA) em colaboração com a NASA enviaram uma sonda (*Cassini-Huygens*), que desceu e pousou em Titã. Muito do que foi dito atrás foi observado nesta missão.

Porque é que existe esta atmosfera tão densa em Titã?

Ora Titã tem maior massa e menor temperatura que Europa. Na região de Saturno, o NH_3 e o CH_4 solidificam e podem existir na forma de gelos, enquanto na região de Júpiter o único gelo é o gelo de água. Assim, durante a formação de Titã, este terá incorporado NH_3 e CH_4 , os quais posteriormente, por diferenciação, se terão deslocado para a superfície. Aqui, a luz do Sol dissociou o NH_3 , dando origem a N_2 . Mas estudos mais recentes indicam que a maior parte do N_2 da atmosfera é proveniente da nuvem de Oort associada a cometas e não dos materiais que formaram Saturno (Nasa News, 2014, June 23).

Há também a possibilidade de existir um oceano de água líquida no seu interior.

Aspetos há da superfície que só são explicáveis se a lua tiver atividade tectónica. Por outro lado, já foram detetadas tensões de maré periódicas em Titã, causadas por Saturno e que causam deformações da superfície de 10 m quando seria de esperar muito menos no caso de ser sólida. Além disso, um sinal elétrico de frequência muito baixa registado pelos instrumentos da Cassini foi recentemente interpretado como uma ressonância entre a ionosfera de Titã e uma superfície condutora, solido-liquido, que se encontra, não na superfície que é má refletora, mas aproximadamente 50 km abaixo dela. Medidas da assincronicidade da rotação de Titã sugerem que a crosta se encontra desacoplada do interior e que a única razão plausível é supor que há um oceano a separar a crosta do resto do interior. Prevê-se então uma espessura de 50km a 150km para essa camada constituída por uma mistura de, água+ NH_3 com este último a atuar como anticongelante. Assim, Titã encontra-se diferenciado com essa camada liquida situada

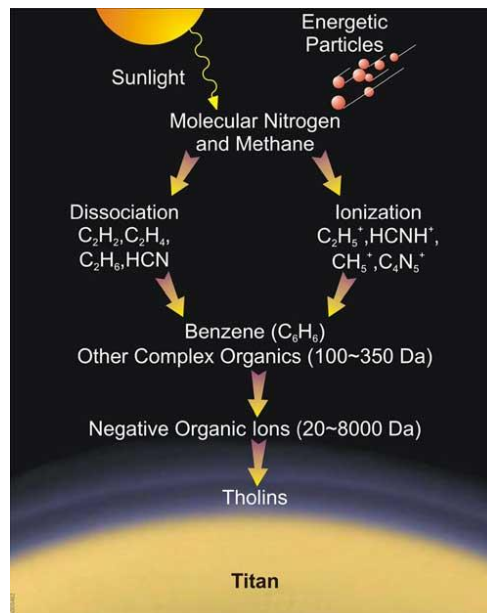


Fig. 12 A química complexa da atmosfera de Titã e a sua estrutura em camadas de acordo com as descobertas feitas através dos instrumentos a bordo da missão Cassini-Huygens. Fonte Imagem cedida por cortesia da NASA/JPL/H.Waite e retirada da obra, Life Beyond Earth

entre uma camada superior de gelo e uma camada inferior também de gelo mas de alta pressão e só depois por baixo é que se encontra um enorme núcleo constituído por rocha hidratada. E esse oceano talvez seja muito mais salgado que os mares da Terra, talvez tanto como o Mar Morto.

A existência de CH_4 também levanta problemas. Todo o CH_4 que existe em Titã levaria cerca de 10^7 anos a ser destruído pela luz UV do Sol (Lorenz, 2008, p. 43). Tem de existir uma fonte qualquer a reabastecer Titã. Ora, a quantidade de hidrocarbonetos que existe na forma líquida à superfície é demasiado pequena para manter esta camada constante em escalas de tempo geológicas. Há várias hipóteses. Uma delas propõe que o CH_4 está armazenado no interior da lua sob a forma de clatratos e que ao longo dos tempos foi libertado por criovulcanismo. E outra propõe que é de origem biológica.

Um oceano líquido de água contendo NH_3 também poderia conter CH_4 e este poder libertar-se através da crosta. Assim funcionaria como um reservatório para armazenar CH_4 e poderia abrigar organismos que terão de sobreviver a altas pressões e concentrações de NH_3 , assim como a baixas temperaturas - condições extremas mas não muito diferentes de algumas encontradas na Terra. Por exemplo, os metanogénicos podem existir em elevadas concentrações de NH_3 a pH neutro.

Há uma diferença significativa entre Titã e Europa: Em Titã a camada líquida não está com quase toda a certeza, em contacto com o núcleo silicatado. Ora, a superfície de Titã (tal como Marte e Europa) encontra-se atualmente, numa localização pouco provável para a vida, pelo menos do tipo terrestre. Contudo há cientistas que continuam a achar que o oceano interno de Titã pode suportar vida do tipo terrestre, podendo esta ter sido introduzida lá vinda de fora ou ter-se formado há muito tempo na história de Titã quando o oceano estava em contacto com silicatos.

Quais as perspetivas de Vida em Titã?

É pouco provável que a tão baixas temperaturas, com reações químicas muito lentas, se tenha desenvolvido Vida em Titã. E a presença de líquidos (CH_4 e C_2H_6) não ajudarão muito, pois não são bons solventes quando comparados com a água. Também as formas de energia disponíveis são muito fracas. Assim, de uma maneira geral, não se espera que haja Vida em Titã, mas a presença desta química de moléculas orgânicas tão rica poderá sempre conter alguma surpresa! Eis uma delas: alguns estudos mostraram que as bactérias terrestres podem satisfazer as suas necessidades de energia e carbono comendo “tolinas” que são abundantes na atmosfera de Titã e conseqüentemente, fornecem um meio para capturar a energia libertada dos raios UV e torná-la disponível para reações metabólicas.

E se a vida se puder basear noutra solvente?

A Huyghens detetou o deslocamento para baixo e desaparecimento de H_2 na superfície de Titã e na distribuição superficial de hidrocarbonetos não se detetou C_2H_2 . Este forma-se na alta atmosfera e depois cai. Mas pelos vistos não chega à superfície. Já se avançaram com explicações não biológicas para os fenómenos mas há quem defenda ser isto consequência de servirem de alimento, à superfície, a formas de vida baseadas no CH_4 . Estas consomem H_2 e C_2H_2 e formam CH_4 . Mas faltam as provas.

2.3.6.2. Enceladus - uma pequena lua muito ativa

Uma lua pequenina, com pouco mais de 500 Km de diâmetro mas que lança plumas gigantescas de matéria que atingem 900 km de altitude! Incrível!

Esta lua encontra-se cheia de atividade vulcânica mas localizada. A sonda Cassini detetou 101 plumas distintas de todos os tamanhos, contendo vapor de água, partículas de gelo e componentes orgânicos, a surgir de 4 fraturas proeminentes designadas por “listras de tigre” localizados no polo sul de Enceladus. Ora, descobriu-se que as plumas individuais são coincidentes com pontos quentes de pequena escala, apenas com algumas dezenas de quilómetros de diâmetro e que são pequenos demais para serem produzidos por aquecimento de fricção mas com o tamanho certo para serem o resultado da condensação do vapor nas paredes próximas da superfície das fraturas. Logo, não é o calor que está a causar as plumas mas sim o contrário. E não podem ser um fenómeno próximo da superfície.

Por outro lado, em duas passagens da Cassini pela região do polo sul, houve mudanças na velocidade da nave espacial de 0,2-0,3 mm/s que permitiram inferir a distribuição de massa no interior desta lua. () Uma anomalia de gravidade maior que a média poderá dever-se a uma montanha, enquanto uma menor

Parâmetros e propriedades	Titã	Enceladus
Distância média a Saturno (em 10^3 km)	1222	238
Distância média a Saturno (em r_{Saturno})	20,2	4
Período orbital (em dias)	15,95	1,37
Diâmetro equatorial (em km)	5150	252-257
Massa (em $\%m_{\text{Saturno}}$)	0,024	0,000009
Massa (em unidades 10^{22} kg)	13,5	0,0050
Densidade relativa	1,88	1,61
Temperatura média à superfície (em $^{\circ}\text{C}$)	-180	-237,6
Albedo geométrico	0,22	0,7
Excentricidade	0,0292	0,0045
Composição da atmosfera (principais gases)	N_2 95-98%, CH_4 , Ar, C_2H_6 C_3H_8 C_2H_2	

implica um défice de massa. Primeiro, nota-se a existência de uma depressão no gelo de 1 km no polo sul: ora menos gelo implica menos massa e logo menor gravidade na sua vizinhança - uma anomalia negativa. Segundo, foi detetada nessa mesma região uma maior gravidade do que aquela que estaria presente se nessa depressão

continuasse a camada de gelo - uma anomalia positiva. Para explicar estes dois fenómenos, só a presença de um material mais denso na depressão, por exemplo, água líquida.

É evidente que a gravidade não dá informações acerca da natureza do material presente. Mas os corpos gelados têm dois tipos de materiais, rochas e gelos, que podem explicar a densidade do corpo e sua estrutura interna. E a água explica bem. Assim, supõe-se haver uma camada de água líquida localizada na região do polo sul estendendo-se pelo menos até 50° de latitude com a espessura de 8 a 10 km a cerca de 30 a 40 km abaixo da superfície gelada. Além disto tudo, fendas estreitas só permanecem abertas atravessando toda a camada de gelo desse tal mar até à superfície se forem preenchidas com água líquida. (NASA, 2014).

Mas há mais a apoiar a hipótese de água líquida: a análise desses jatos revelou a presença de sais não só na água e nos materiais orgânicos, mas também no gelo. E é semelhante à encontrada nos oceanos da Terra. E revelou a presença de NH_3 . Este, misturado com água, funciona como anticongelante.

Uma pequenina parte do que é expelido consegue-se libertar indo parar ao anel E, alimentando-o continuamente. E há uma frágil atmosfera à volta de Enceladus: uma parte dela perde-se continuamente para o espaço mas é continuamente reposta pela atividade vulcânica. A contínua deposição de partículas de gelo na superfície torna esta a mais reflexiva do sistema solar (albedo de 0,90). Logo é muito jovem.

Também o brilho total das plumas muda periodicamente de acordo com a translação desta lua em volta de Saturno. É a abertura e o fecho das fraturas que controla as saídas de material e logo o seu brilho. Logo isto é consistente com a flexão de maré exercida por Saturno na lua. E são as consideráveis forças de marés que vão dissipar o calor suficiente para o interior ser muito quente e líquido.

Enceladus está em rotação síncrona e possui uma órbita com uma ligeira excentricidade que é em parte excitada por outra lua, Dione, com a qual está numa ressonância, 2:1 (Sotin, Grasset & Tobie, 2009, p.308-309). A potência observada é várias vezes superior à potência térmica fornecida pelo decaimento radioativo do seu interior (50% desta lua são silicatos); esta segunda fonte de energia não é o principal responsável por toda esta atividade.

O fluxo de transferência desse calor também exige que a zona do polo sul seja tectonicamente ativa. A convecção térmica é insuficiente para explicar a perda de calor pelo que se supõe a existência de uma região ativa em expansão a partir de cristas (de modo análogo ao que acontece com as cristas oceânicas terrestres).

Enceladus tem energia, CHNOPS e água líquida. E vida?

À superfície não é provável mas o seu oceano interior poderá ter vida extremófila, pois há contacto da camada de água com a parte silicatada, que a vai abastecer de elementos vitais. E pode haver sistemas de vida metanogénicos em que os organismos vivos obtêm a energia e os blocos construtores de vida, sintetizando o CH_4 a partir de CO_2 . Mas também há C_2H_2 . De facto, na Terra há muitos organismos que se alimentam desta substância. Mas não foram detetados os produtos laterais do metabolismo do acetileno tais como o formaldeído e o acetato.

Mas os produtos químicos encontrados nas plumas podem surgir de vários processos que não envolvam água líquida. Encontrar ácido cianídrico nas plumas e não outros produtos resultantes da sua reação com a água líquida poderá provar que não esteve em contacto com água líquida.

2.3.7. Tritão em contramão

Tritão gira à volta de Neptuno no sentido contrário ao da maioria dos outros satélites. Logo não se formou à beira de Neptuno. Talvez fosse um objeto da cintura de Kuiper que foi capturado por Neptuno nos inícios do sistema solar. Após a captura, a sua órbita teria sido elítica, de elevada excentricidade o que gerou elevadas marés e a fricção dessas marés causou perda de energia. Ora, essa energia transformou-se em calor no interior fundindo algum do gelo lá existente e formando um oceano interno. Mas a energia perdida por ação das marés diminuiu gradualmente a excentricidade da órbita, até esta passar a ser circular. Tudo isto ocorreu em cerca de 10^8 anos (Coustenis and Encrenaz, 2013, p.182-183).

Pensa-se que este oceano ainda exista hoje. E porquê?

O decaimento de elementos radioativos dura biliões de anos, é homogénea, e presentemente gera calor várias vezes superior ao gerado por efeito de maré. Para se ter uma ideia dos valores em jogo, não só para Tritão mas também para outras luas do sistema solar pode-se consultar a página 276 do livro Colinas et al, *Plantear Tectónicas*. Contudo, se só atuar este tipo de calor, não é possível manter um oceano líquido durante o tempo enorme de 4,5 Ganhos. Mas a dissipação de calor por marés não é homogénea e supõe-se estar concentrada na base da camada de gelo, o que impede que esta cresça, ou seja, atua efetivamente como uma manta de aquecimento. É evidente que o aquecimento de maré foi mais forte no passado. E depende da espessura da camada de gelo: se for pequena as forças de maré terão um efeito mais pronunciado e o aquecimento é maior; se for grande então a lua torna-se mais rígida e o aquecimento é menor. E pela densidade de Tritão ser muito elevada ($\rho = 2,07$

g/cm³), estima-se que 75% são formados por rocha. O que implica uma estrutura interna com um núcleo muito grande de rocha silicatada, revestida por um oceano líquido de água e NH₃ e em cima desta uma camada de gelo. Ora quanto maior é o núcleo de rocha silicatada maior é o calor libertado por decaimento radioativo o que aumenta a espessura da camada líquida. Mas a profundidade do oceano pode não ser uniforme. E a dissipação de maré pode concentrar-se nos polos, o que permite inferir que é nesta zona que é mais profunda. Cálculos recentes permitem concluir que os corpos do sistema solar exterior contêm NH₃ que pode atingir 15%. Então a água desse oceano deverá estar misturada com este anticongelante, o que ajuda à sua manutenção.

Em 1989, a *Voyager 2* ao passar perto de Tritão mostrou imagens de geysers com alturas de vários quilómetros. Isto é vulcanismo ativo mas a lava que sai em vez de ser água líquida, é uma mistura de gelos pastosos, azoto, CH₄ e poeiras líticas que vaporizam à baixa pressão da ténue atmosfera existente formando plumas que podem atingir mais de 100 km de altura. Mas parece só se dar com os materiais da superfície e serem o resultado de diferentes estações causadas pela radiação solar (Tritão vira os polos alternadamente para o Sol pois o seu eixo de rotação está muito inclinado).

A atmosfera é tão ténue que mais parece ser uma criação do criovulcanismo. É muito extensa, indo até cerca de 950 km de altitude, bem estruturada, mas a nível do solo, apresenta uma pressão muito baixa, 14 µbar, e a mais baixa temperatura do sistema solar, 35,6 K, (albedo muito elevado e radiação solar recebida muito fraca). Mas os raios UV provocam a fotólise do azoto e CH₄ e que vão criar na baixa atmosfera, uma névoa provavelmente constituída por hidrocarbonetos e nitrilos. O que é um verdadeiro cocktail de compostos orgânicos à semelhança de Titã. A superfície deve estar coberta de compostos orgânicos resultantes desta fotólise, tem poucas crateras de impacto logo é muito jovem com muito nitrogénio gelado mas também gelo de água, CO₂, CO e CH₄ e sinais de ocorrência de fluxos de lava.

Que possibilidades de vida há nesta lua?

Nas profundezas de Tritão pode existir vida microbiana. O amoníaco presente no oceano pode manter este no estado líquido a temperaturas de 176 K (-97°C), o que baixa muito as velocidades das reações químicas que ocorrem nos seres vivos. No entanto, há enzimas terrestres que aumentam a velocidade das reações das células atuando a 170K. Logo poderia atuar em Tritão algo de semelhante acelerando as reações químicas no interior das células e tornando-as mais eficientes.

Como a camada não é uniforme permite uma maior superfície de contacto entre a base do oceano e a camada silicatada permitindo trocas mais frequentes de elementos essenciais à vida.

Mas há outra possibilidade ainda que remota. Tritão poderá abrigar vida baseada no silício em vez do carbono. Ora os silanos, que são estruturalmente semelhantes aos hidrocarbonetos, podem ser usados como blocos construtores da vida se existirem as condições adequadas. Mas não se conhece muito bem o comportamento dos silanos em tais condições pouco usuais (Coustenis & Encrenaz, 2013, p.184).

2.3.8. Cometas, essas bolas de gelo sujas

Os cometas são os objetos do sistema solar mais ricos em água, os remanescentes menos alterados das condições e processos em ação no sistema solar primitivo e a sua composição química mostra notáveis semelhanças com a matéria interestelar. Mas há mais como veremos a seguir (Coustenis & Encrenaz, 2013, p. 170-174).

A observação de um cometa pode ser difícil. Muito longe do Sol é um objeto frio que consistindo apenas no seu núcleo, no máximo com poucos quilómetros, demasiado fraco para ser fotografado ou observado por espectroscopia a partir da superfície da Terra. Mas quando se aproximam do Sol, a superfície do núcleo sublima por ação da radiação solar; a água e outros gases na forma de vapor são ejetados transportando consigo algumas poeiras formando a coma que desvia a luz do Sol e se torna cada vez mais brilhante. Analisando o brilho podem ser identificados os componentes da coma - mas o núcleo permanece escondido debaixo da coma. Além da coma formam-se duas caudas: uma retilínea e outra curva.

Podem ser provenientes de dois locais: nuvem de Oort descrevendo órbitas de grandes excentricidades (ou até aperiódicas), com grandes períodos e inclinações caóticas: cintura de Kuiper descrevendo órbitas pouco excêntricas, pouco inclinadas (próximas da eclíptica) e de pequenos períodos. Logo, formaram-se em zonas diferentes.

Na sua composição temos por ordem decrescente água (80% em número), CO e CO₂ (cerca de 10%), CH₃OH, NH₃, CH₄ e H₂CO (cerca de 1%). Várias missões espaciais também detetaram silicatos e muitos compostos orgânicos simples e complexos: hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), argilas, carbonatos, compostos orgânicos com cadeias alifáticas, metilamina CH₃NH₂, etilamina CH₃CH₂NH₂ e possivelmente glicina NH₂CH₂COOH. Alguns destes compostos já foram detetados à volta de estrelas próximas: por exemplo, forsterite, encontrada no cometa Hale-Boop

(proveniente da nuvem de Oort) um tipo especial de olivina rica em magnésio (Mg_2SO_4) foi detetada no disco de poeiras á volta da estrela HD69830, que tem um sistema de 3 exoplanetas.

Os núcleos apresentam formas alongadas e altamente irregulares (a força da gravidade não é suficiente para lhe dar a forma esférica) sendo parcialmente cobertos com gelo e parcialmente com material refratário, muito provavelmente de natureza carbonácea, com albedos quase nulos, portanto, mais escuros. Esses materiais são provavelmente compostos orgânicos de longas cadeias com elevada massa molecular deixados para trás depois do calor solar ter expulsado as substâncias mais voláteis, tendo a cor escura semelhante ao alcatrão ou petróleo. Ora o material gelado parece encontrar-se a vários metros abaixo da superfície e, sendo esta muito escura o calor das radiações solares vai ser cada vez mais absorvido à medida que o cometa se aproxima do Sol o que vai provocar a expulsão de gás dos compostos mais voláteis do interior do cometa formando-se a coma e as caudas.

Sabe-se também que os aminoácidos presentes nos cometas poderão ter sido fabricados quando corpos rochosos colidiram com as superfícies geladas dos cometas ou partículas geladas, num processo designado por *síntese de choque*. Experiências têm sido feitas para simular esses choques

A composição química dos cometas varia, em particular a razão, poeiras/gás, assim como a abundância de carbono. Nos cometas da cintura de Kuiper há um enfraquecimento de carbono.

Cometas e a origem da vida

Os cometas podem ter sido responsáveis quer por trazer a vida à Terra quer por destruí-la devido a impactos catastróficos. Assim, no primeiro caso, poderão ter servido de meio de transporte para a vida se poder propagar pelo espaço interplanetário, abrigada em parte da letal radiação UV aí presente. No segundo caso, há a incrível possibilidade de outra face da moeda ter funcionado: ao cair no solo, o próprio embate induziu os aminoácidos presentes a ligarem-se uns aos outros na ausência de enzimas.

Mas poderão os cometas serem habitats? Dos três vértices do triângulo da vida, o vértice CHNOPS é facilmente satisfeito como se pode confirmar pelo meteorito de Murchison mas os vértices da energia e da água líquida são mais problemáticos.

Não se conhecem organismos que consigam crescer em gelo puro ou possam extrair água líquida do gelo usando a energia dos seus metabolismos. E pensou-se também durante muito tempo que a água presente num cometa só poderia estar no estado sólido ou gasoso. Mas então como explicar as várias evidências de ter ocorrido fusão

da água? De facto, os minerais nas condrites carbonáceas C1 apresentam sinais de alterações aquosas que surgiram nos corpos que as originaram. Se os corpos originais foram cometas a presença da água líquida nos seus interiores não necessita de mais provas. Poeiras de cometas (partículas de poeiras interplanetárias) colhidos na atmosfera também exibem alteração aquosa em estados hidratados. Incluem componentes de argilas, serpentinas e carbonatos partilhando muitas semelhanças mineralógicas com o material condrítico.

Wickramasinghe calculou em 2 km o raio mínimo para um cometa poder ter água líquida no seu interior (Wickramasinghe & Napier, 2010, p. 157-160). Muitos autores têm considerado a possibilidade do calor fornecido pela desintegração dos isótopos radioativos de curta duração, tais como o alumínio-26, ($T_{1/2} = 7,4 \times 10^3$ anos) e ferro-60 ($T_{1/2} = 1,5 \times 10^6$ anos), ter mantido água líquida no núcleo dos cometas o tempo suficiente para que formas de vida se possam ter desenvolvido. Cálculos da energia libertada por kg de material interestelar, contendo estes dois isótopos, indicam valores totais de, 3×10^7 J/kg. Ora, esta energia é cerca de duas ordens de grandeza o valor do calor de fusão do gelo de água ($3,34 \times 10^5$ J/kg). A probabilidade de poder haver água líquida nos núcleos cometários torna-se assim, numa quase certeza.

Além disso, o alumínio-26 decai originando o magnésio-26 que é estável e um excesso deste isótopo até foi encontrado em inclusões Ca-Al no meteorito de Allende. O alumínio-26 estava provavelmente presente no disco protoplanetário, produzido por novas e/ou supernovas existentes nas antigas vizinhanças galácticas do Sol. Cálculos efetuados considerando a condutividade do gelo, permitiram concluir que um cometa com um raio médio pelo menos de 10 km poderia ter as condições necessárias de pressão e temperatura para no seu núcleo existir água líquida durante cerca de 1 milhão de anos antes do decaimento radioativo do alumínio-26 se esgotar. Por outro lado, estes núcleos fundidos podem ter ficado rodeados de uma camada de gelo de pelo menos 1 km de espessura tendo o vapor de água formado no núcleo central vazado através de fissuras e interstícios e depois recondensado em gelo. Assim uma quantidade mínima de bactérias inicialmente incluída no material cometário poderia, neste ambiente adequado e protegido, ter-se replicado exponencialmente em escalas de tempo muito mais curtas que as necessárias para a resolidificação. Depois solidificariam durante vários Ganos, até encontrarem um ambiente adequado e aí poderem ainda estar aptas a semear a vida. Assim, no caso da vida estar omnipresente no Universo, logo presente na matéria interestelar onde o Sol e outras estrelas se formaram, os cometas podem ser considerados como os vetores adequados para a transportar do material nebular para a superfície da Terra ou de

outros corpos celestes. Contudo, ainda não se sabe o bastante sobre a sobrevivência de formas de vida adormecidas em ambientes hostis, com grandes doses de radiação e na ausência de água líquida, para avaliar se este cenário é plausível.

Quanto ao tempo em que essa camada permaneceu líquida convém considerar haver outras fontes mais seguras de calor radioativo fornecida pelos núclídeos, tório-232, urânio-238 e potássio-40 principalmente para os cometas que demoraram longos períodos de tempo a condensar. E quanto maiores forem os cometas maior é a fração e a duração da sua camada líquida. Além disso, uma vez estabelecida a camada líquida, fontes de calor provenientes de recombinação de radicais e moléculas orgânicas produzirão mais fusão. E cria-se mais calor devido à hidratação de partículas das rochas. Por exemplo, no caso da formação do $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ a energia libertada por unidade de massa é semelhante ao calor de fusão do gelo pelo que junto do limite de uma camada de gelo haverá fusão descontrolada.

No entanto há também objeções a que isto se possa ter passado assim. Apontam-se terem existido mecanismos mais eficientes de arrefecimento do núcleo, tais como a condução através do gelo e o calor transportado pelo fluxo de gás através do núcleo poroso tornar mais difícil atingir as condições para se dar a fusão no núcleo. Assim quando a temperatura atinge ~ 137 K vai haver transição da fase amorfa do gelo para a fase cristalina o que acarreta a libertação de calor latente de fusão suficiente para transformar a camada adjacente. Esta, por sua vez, liberta calor latente e cristaliza e o processo continua até à camada mais exterior (Fernández, 2005, p. 331-334). Aqui, o calor rapidamente escapa para o espaço. Além disso a condução de calor pela camada cristalina é mais de uma ordem de grandeza mais rápida que a do gelo amorfo, logo o arrefecimento é muito mais rápido, de modo que a temperatura através do núcleo também desce rapidamente. Além disto, há um problema adicional até agora ignorado: os cometas podem não ter sido assim paraísos tão seguros com existências muito tranquilas. No sistema solar primordial os cometas foram sujeitos a colisões mútuas que levaram a sucessivas fragmentações e re-acumulações, de modo que é quase impossível terem permanecido imperturbados. Assim, restam os corpos com raios superiores a 100 km que poderão não ter sofrido colisões catastróficas para serem os melhores candidatos a terem ambientes líquidos nos seus interiores. Os objetos da cintura de Kuiper são melhores alvos como potenciais habitats, como veremos a seguir (Coustenis & Encrenaz, 2013, p.179-180).

2.3.9. O sistema Plutão-Caronte e outros TNO's

Dois grandes objetos da cintura de Kuiper, proto-Plutão e proto-Caronte, colidiram um com o outro há muito tempo formando-se o sistema Plutão-Caronte.

Sabe-se por ocultação que Plutão tem uma pequena atmosfera que é muito fina dominada por N_2 com uma fração significativa de CO e vestígios de CH_4 . E contendo C_2H_6 , deve haver a fotólise do CH_4 que vai cobrir a sua superfície de produtos orgânicos que se vão juntar aos gelos de azoto, CH_4 e CO. Quanto a Caronte não tem atmosfera e a sua superfície é maioritariamente de gelo de água. Como a órbita de Plutão é muito excêntrica a distância de Plutão ao Sol varia entre 29 UA e 49 UA o que provoca fortes variações na pressão da atmosfera. Que pode até desaparecer quando Plutão se encontrar no afélio.

Atualmente é difícil de saber se os dois corpos estão diferenciados, mas se tudo resultou de uma grande colisão deve-se ter gerado calor suficiente para que tudo fundisse e a diferenciação ocorresse. Aliado à grande excentricidade da órbita e às quatro luas além de Caronte, que geram marés temos o calor biogénico gerado pelos silicatos e mais de metade de Plutão (densidade de Plutão, ($\rho = 2.03 \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$) deve-os ter (60% silicatos e 40% de gelos) pelo que se torna possível pensar num oceano interno entre o núcleo de silicatos e a camada superficial de gelos. Novamente o contacto de uma camada líquida com a camada silicatada pode fornecer elementos indispensáveis para a existência de vida de natureza extremófila. Poderemos estar perante um caso semelhante a Tritão.

Mas Plutão é um dos muitos objetos transneptunianos, (TNO's) que estão a ser descobertos e alguns são das mesmas dimensões ou até maiores (Éris, por exemplo). Ora, estes objetos são importantes para sabermos mais sobre o passado do sistema solar. As suas propriedades orbitais são importantes para decifrar a sua história dinâmica e conhecermos melhor a migração dos planetas e a origem do bombardeamento tardio (Coustenis & Encrenaz, 2013, p.179-180).

Os maiores devem ter densidades semelhantes ou maiores que Plutão (Éris é um pouco maior que Plutão e a sua densidade é maior. Logo as possibilidades de vida poderão ser semelhantes às de Plutão e de Tritão.

3. A VIDA FORA DO SISTEMA SOLAR

The earth would only have to move a few million kilometers sunward - or starward - for the delicate balance of climate to be destroyed.

The Antarctic icecap would melt and flood all low-lying land, or the oceans would freeze and the whole world be locked in eternal winter.

Arthur C. Clarck, *Rendezvous with Rama*, 1973

3.1 ZONAS HABITÁVEIS NO UNIVERSO

3.1.1 Zonas habitáveis estelares

Estar no lugar certo à hora certa. É o segredo de muitos desportistas para marcar golo e também é o segredo da vida para povoar o Universo. A maior parte do Universo é claramente hostil à vida e apenas raros oásis oferecem condições para a sua existência. O espaço vazio e os interiores das estrelas devem claramente estar sem vida. Pelo menos como a que conhecemos (Ward & Browlee, 2004, p. 15-17).

Um dos atributos da Terra mais importantes para abrigar vida é a sua localização relativamente ao Sol. Logo, em qualquer sistema planetário também deverá haver regiões à volta da estrela central dentro das quais um ambiente superficial semelhante ao da Terra pode ocorrer. Esta é a base para se estabelecer a definição de zona habitável - HZ (*habitable zone* em língua inglesa).

A HZ é a região à volta de uma estrela onde o seu aquecimento proporciona numa superfície planetária rochosa um ambiente em que um oceano de água seja estável, o que, à pressão de 1 atmosfera, acontece a temperaturas entre 0°C e 100 °C. Geometricamente tem a forma de um anel. Na região da estrela até ao anel, a água evapora (temperaturas demasiado altas) e da face exterior do anel para fora a água congela (temperaturas demasiado baixas). Ocupar a HZ é semelhante a estar próximo de uma fogueira numa noite fria de inverno da Sibéria. Se nos aproximarmos demasiado corremos o perigo de nos queimarmos e se nos afastarmos podemos morrer congelados.

No sistema solar pode-se fazer o cálculo dos raios interior e exterior desse anel teoricamente habitável. Assim tudo o que esteja de 118 a 220 milhões de quilómetros está dentro das condições ótimas obviamente a pressões de 1 atmosfera e não olhando a outros fatores. Só a Terra e a Lua é que se encontram na HZ solar pois Marte situa-se em zonas demasiado frias e Vénus em zonas demasiado quentes.

Mas os planetas também refletem parte dessa energia, sendo a razão da energia refletida chamada de *albedo*. E quanto maior o albedo, tanto mais energia o planeta reflete para fora e portanto tanto mais se vai ter de aproximar da estrela para atingir uma determinada temperatura. Ou seja a HZ vai-se aproximar da estrela.

Mas há outros fatores que influenciam o tamanho da HZ. A existência de uma atmosfera pode alterar decisivamente as previsões devido ao efeito de estufa que, por sua vez é controlado pelo ciclo, CO₂-silicatos. E mares de água líquida e CO₂ no ar são fundamentais para o funcionamento desse ciclo. Logo estes dois fatores definem mesmo os limites, interior e exterior, da HZ, ou mais exatamente, a distância a partir da qual é acionado um efeito de estufa descontrolado define o limite interior da HZ e a distância a partir da qual se dá uma glaciação rápida fatal, define o limite exterior da HZ. Portanto, um planeta só se pode manter adequado ao aparecimento de vida durante muito tempo, se não cair em efeitos de estufa e glaciações descontrolados. Ora, isto já aconteceu com a Terra.

Através de simulações computacionais do clima da Terra, foram feitas estimativas da extensão da HZ do Sol. Dependendo dos pressupostos para os vários fatores, a HZ varia de uns 0,7-1,2 UA, até uns 0,958-1,004 UA. Ora, a HZ estelar é muito delgada.

O tipo de órbita também é importante. Numa órbita elítica, a somar ao perigo dum planeta se poder aproximar demasiado de outros e devido a efeitos gravitacionais ser totalmente atirado para fora da HZ, surgem problemas climáticos graves. Assim, numa parte da trajetória, esse planeta vai tender para um efeito de estufa descontrolado e na outra para uma glaciação descontrolada. Mesmo com toda a órbita dentro da HZ as fortes oscilações impostas no calor tornam o clima caótico, não permitindo que as condições necessárias para a vida estabilizem. Contudo, grandes oceanos poderão atuar como um banho termostático, aquecendo lentamente e armazenando o excesso de calor do verão para o libertar durante a região mais exterior da órbita.

O conceito da HZ é importante mas estar dentro dela não é um requisito essencial para a vida. A vida pode existir fora das HZ das estrelas. Os astronautas, em naves convenientemente projetadas e alimentadas podem sobreviver quase, em qualquer parte do sistema solar, aliás, em qualquer parte das vastas e frias regiões de todo o Universo. Além disso, a descoberta dos extremófilos, requer que o conceito de HZ seja visto sob novas e bem diferentes perspetivas. A HZ normalmente definida parece mais uma *HZ animal*. ((Ward & Browlee, 2004, p. 19-21). Os organismos extremófilos que vivem a grandes profundidades debaixo da Terra e necessitam apenas de quantidades

mínimas de energia química e água poderão crescer fora da HZ numa grande variedade de ambientes incluindo as regiões do subsolo de planetas, luas e mesmo asteroides. Um bom exemplo é Europa.

Portanto, o conceito de HZ deve ser alargado para incluir outras categorias. Para planetas como a Terra, a zona habitável animal (AHZ) é o domínio de distâncias da estrela central onde é possível a um planeta semelhante à Terra reter um oceano de água líquida e manter uma temperatura global inferior a 50°C. Assim, esta temperatura parece ser o limite superior acima da qual nenhuma vida animal consegue existir (pelo menos do tipo encontrado na Terra). Esta zona já é mais restrita que a HZ convencional. No entanto uma zona ainda mais restrita poderá ser uma em que o ser humano possa viver, digamos um planeta onde suficiente trigo ou arroz pode ser cultivado para alimentar populações de vários milhares de milhões de seres humanos. No outro extremo podemos ter uma zona muito mais extensa mas que poderá ser mais facilmente determinável, a zona habitável dos micróbios, (MHZ), a região à volta de uma estrela onde a vida microbial pode existir. Ora, aplicando isto à nossa estrela é quase todo o sistema solar e desde quase os seus inícios até hoje. E outras HZ podem também ser definidas para outras categorias de vida. E a zona habitável das plantas será mais extensa que a dos animais mas menos extensa que a MHZ.

Uma HZ também deverá ser pensada em termos de tempo. Desde que a Terra apareceu o Sol tornou-se mais brilhante cerca de 25 % mas o ciclo carbonato-silicato tem mantido a temperatura global média notavelmente constante. Mas esses limites da zona habitável solar vão mover-se para fora à medida que o tempo passar pois o Sol vai tornar-se cada vez mais luminoso. E a Terra provavelmente vai ficar para trás, o termostato atmosférico vai-se quebrar e o inevitável efeito de estufa descontrolado entrará em ação transformando-a talvez num novo Vénus. Isso vai acontecer daqui a 1 a 3 Ganos, isto se a perda de massa do Sol que também a vai ter gradualmente, () vá causar um afastamento progressivo das órbitas que seja inferior ao avanço dos limites da HZ. Mas o brilho depende da massa da estrela. Quanto mais massiva é uma estrela, mais rapidamente vive, logo menos tempo tem um planeta para continuar na HZ. É o conceito de **zona habitável continua**: o planeta deverá estar na órbita certa mas a sua estrela central deverá também ser do tipo adequado, de vida longa.

Devido ao tempo enorme que a evolução biológica necessita para chegar aos organismos complexos, - centenas de milhões a vários Ganos - as AHZ e MHZ são domínios espaciais mas também temporais. A mais restritiva das zonas, a AHZ, é também paradoxalmente, a que permite a maior diversidade de vida. A Terra está

nesta HZ, mas Vénus e Marte têm estado fora dela talvez há Ganos. A órbita de Vénus é 30% mais próxima e a de Marte 50% mais distante do sol que a órbita terrestre, passando-se o contrário quanto à intensidade da luz solar recebida: a iluminação de Vénus é o dobro e a de Marte é metade da sentida pela Terra.

Entretanto uma nova classificação baseada no que se passa dentro do Sistema Solar, foi proposta num artigo recente por Helmut Lammer e co-autores (Lammer et al., 2009), (ver fig. 13). Segundo estes há 4 classes de planetas habitáveis:

Classe I - Planetas habitáveis onde podem evoluir formas de vida superficiais multicelulares complexas tal como acontece com o nosso planeta. E que necessitam de girar à volta da estrela certa, tais como as estrelas do tipo G ou então do tipo K ou M de massas semelhantes. Assim estrelas destes tipos desenvolvem zonas habitáveis a distâncias suficientemente grandes para que a sua atividade estelar, que também tende a decrescer rapidamente, não se possa provar ser perigosa demais para quaisquer planetas habitáveis que aí estejam a emergir. Se o planeta tiver tectónica de placas ativa durante períodos de Ganos ou mais, também pode preservar a sua atmosfera e água líquida e tornar-se habitável. Para este tipo de habitats há a incerteza de que a vida que se desenvolveu em estágios muito precoces da sua formação tenha beneficiado de condições favoráveis o tempo suficiente para permitir que a evolução persista mesmo depois da perda de toda (ou quase) a água. Neste caso a ideia de panspermia leva à possibilidade de que a vida possa ser capaz de se propagar através do espaço para outro planeta independentemente de ter sobrevivido no seu planeta de origem. No entanto para qualquer forma de vida evoluir para além das suas formas mais simples, as condições ambientais certas tem de ser mantidas por longos períodos de tempo (Coustenis & Encrenaz, 2013, p. 66-68).

Classe II - Ambientes onde a vida se pode originar e desenvolver mas onde os ambientes atmosféricos e magnetosféricos destes planetas localizados dentro da HZ de estrelas de baixa massa dos tipos K e M se encontram consequentemente muito perto das suas estrelas-mães sofrendo de extrema radiação estelar ou exposições ao plasma em períodos de tempo extremamente longos possivelmente na maior parte do seu tempo de vida. É o caso dos planetas que, mesmo estando dentro da zona habitável, os processos de escape atmosférico térmico e não térmico modificam as atmosferas e a quantidade de água líquida dos planetas de modo a que se tornam inativos depois de algumas centenas de milhões de anos e terminam tão secos como Vénus ou tão frios como Marte.

Classe III - Nestes habitats os oceanos internos poderão estar em contacto com silicatos nos chãos dos seus oceanos. Em tais ambientes na Terra, radicais redutores tais como H_2 , estão contidos no fluido quente e podem fornecer energia para uma grande variedade de organismos. Na ausência de semelhantes radicais redutores a fonte de energia necessária para alimentar um organismo noutros planetas pode ser um problema.

Classe IV - Estes habitats podem ser encontrados no nosso sistema solar mas também em exoplanetas onde seja possível existir um oceano interno de água entre duas camadas espessas de gelo ou líquidos diferentes, de modo a que a entrega de material externo se possa tornar praticável através de gelo poroso ou, ainda melhor, da camada líquida.

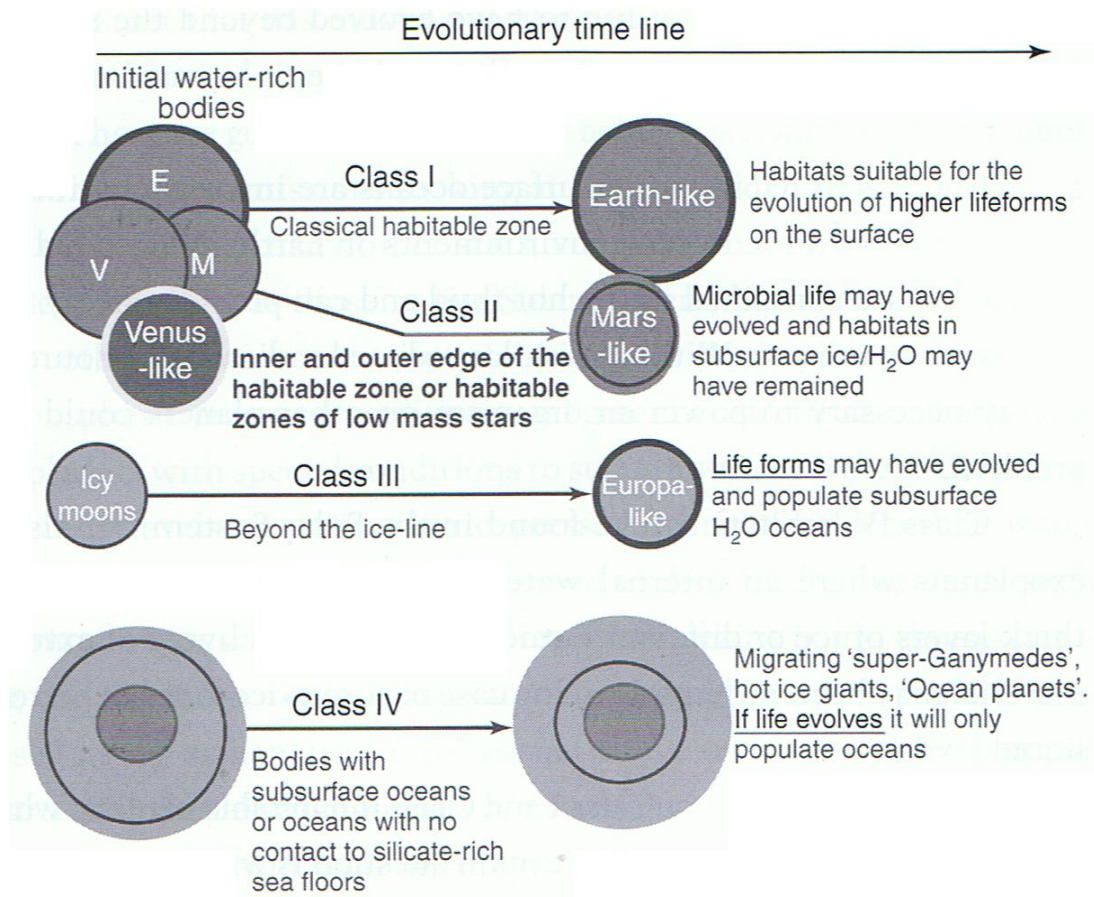


Fig. 13 - Os quatro tipos de habitats que podem existir no Universo: Fonte: *Life in the Universe* de Thérèse Encrenaz and Athena Coustenis (Adaptado de Lammer et al., 2009) pp 67

3.1.2. Zona habitável da galáxia (GHZ)

O conceito de zonas habitáveis também por ser aplicado à galáxia. A nossa galáxia é espiral e vista de lado apresenta a forma de um disco à volta de uma zona central - o bojo. E nesta a concentração de estrelas é muito elevada mas vai diminuir à medida

que nos afastamos dele. E no disco há braços espirais que saem dessa zona central. A Via Láctea tem um diâmetro cerca de 100 mil a.l. e o sistema solar encontra-se a cerca de 28 mil a.l. do centro numa região entre dois braços espirais onde a densidade de estrelas é bastante baixa quando comparada com a dos braços e a do centro. E nesta posição rodamos à volta do centro da galáxia, numa trajetória circular.

A nossa estrela está - por acaso - na zona habitável da galáxia (GHZ). As margens interiores são definidas pela elevada densidade de estrelas, as supernovas e as fontes de energia situadas na zona central da galáxia e as margens exteriores são definidas, pelo tipo de matéria a encontrar. Mas não se sabe com rigor esses limites.

A margem interior situa-se talvez até 10 mil a.l. ou mais do centro galáctico. E neste pode haver demasiado calor ou frio, demasiados raios gama, raios-X ou outros tipos de radiações ionizantes que afetam letalmente a vida (Ward & Brownlee, 2004, 27-29).

E no centro da galáxia existem *magnetars* - um tipo de estrelas de neutrões especiais muito pequenas mas incrivelmente densas que emitem raios gama, raios X e outras partículas carregadas para o espaço. Mas estão muito longe, e a sua energia surge muito diluída e não sendo ameaça para a Terra. Mas são mais frequentes no centro da galáxia, logo parece pouco provável que qualquer forma de vida possa existir perto.

Outro perigo provém de encontros próximos com outras estrelas. Ora no centro da galáxia também se tornam muito mais prováveis. Se o sistema solar estivesse nesta zona, as órbitas dos planetas poderiam ser alteradas o suficiente para desencadear oscilações climáticas selvagens mas também alguns dos cometas escondidos nos confins do sistema solar poderiam ser desviados em direção aos planetas interiores. E a Terra poderia sofrer um novo bombardeamento pesado.

A Via Láctea tem uma estrutura espiral rotativa, muito parecida com a espuma branca a rodopiar numa chávena de café. Se observarmos um cappuccino com mais cuidado, notar-se-á que as regiões interiores giram mais rápido do que as mais afastadas; igualmente, estrelas na nossa galáxia ultrapassam outras situadas no seu lado de fora. Os 4 braços espirais não rodam como formações rígidas, e são regiões onde muitas estrelas estão a nascer e a iluminar o braço antes de migrar. Ora o Sol a girar á volta do centro da galáxia atravessa cada um destes braços espirais, a cada 100 milhões de anos ou mais. Cada travessia demora cerca de 10 milhões de anos e durante esta o sistema solar corre 3 grandes perigos: supernovas, passagens rasantes de outras estrelas e nuvens de poeira interestelar

Nos braços espirais concentram-se muitas nebulosas que podem ter diâmetros de centenas de anos-luz. Ora, o vento solar poderá ser em geral, suficientemente forte para desviar para o lado a nuvem sem qualquer efeito nocivo mas se uma secção da nuvem for demasiado densa então a nuvem poderá dominar a “bolha” protetora do Sol e invadir o sistema solar. A poeira vai então instalar-se nas atmosferas superiores dos planetas, bloqueando a luz solar durante essa passagem (≈ 200 mil anos). Esta nuvem poderá, no mínimo, apagar a fotossíntese, no máximo, iniciar uma glaciação global. Também se tem descoberto que muitas extinções em massa coincidem mesmo com passagens prévias pelos braços espirais.

Como a órbita do Sol à volta do centro da galáxia é circular o sistema solar não mergulha periodicamente em direção ao centro. E também está perto do ciclo de co- rotação (onde a rapidez orbital do Sol à volta do centro é quase idêntica à rotação do padrão do braço orbital) resultando num número mínimo de travessias.

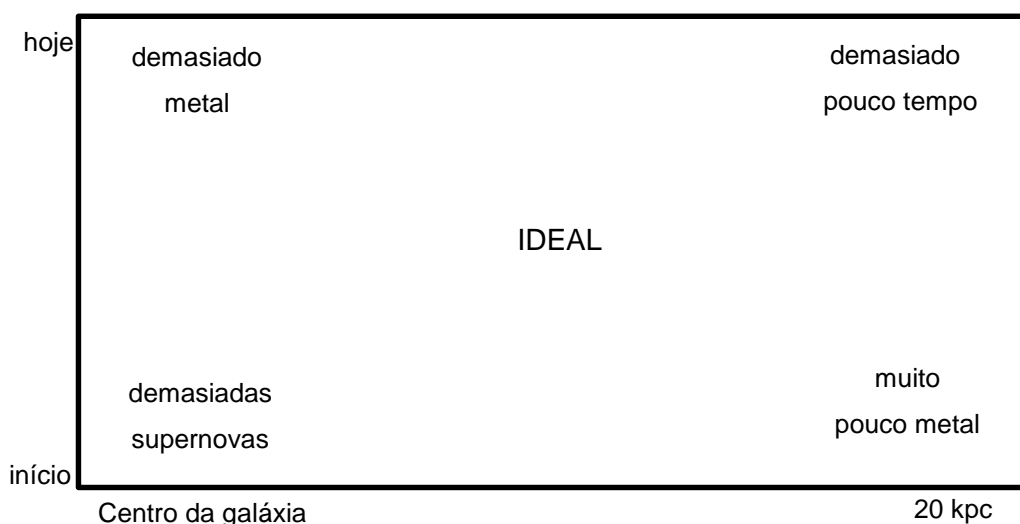


Fig. 14 - Condições da Zona habitável da Galáxia. Da minha autoria.

A margem exterior é definida pela composição elementar da galáxia. Nas zonas mais exteriores a abundância de elementos pesados (ou metalicidade) é baixa - a rapidez de formação de estrelas é menor - logo a formação dos elementos também o é. E não havendo poeiras suficientes, não há os corpos celestes que resultam dessas poeiras. E também não há os elementos radioativos que são necessários para aquecer os interiores dos planetas. Logo, não há formação de núcleos líquidos, nem de campos magnéticos, nem de tectónica de placas e consequentemente, não é possível haver formas de vida complexa como a animal.

As galáxias elíticas têm pouca poeira visto exibirem pouca formação de estrelas. E a maioria das suas estrelas são quase tão velhas como o Universo. Logo a metalicidade

é baixa, e apesar de poderem existir asteroides e cometas, é pouco provável que existam planetas maiores como o nosso. Além disso estrelas nestes tipos de galáxias também têm muitas mais órbitas caóticas e regularmente mergulham em direção ao denso núcleo galáctico, com todos os perigos que isso implica.

3.1.3. Zonas habitáveis e tempo

Nem sempre houve zonas habitáveis no Universo. Não havendo elementos pesados em quantidades suficientes até talvez 2 Ganos ou mais depois do Big-Bang, a HZ do Universo, em termos de tempo, começou apenas depois desta data. Além disso, a “antiguidade” do Universo também era dominada por objetos designados como quasars, que deveriam ter sido muito perigosos (Ward & Brownlee, 2004, p. 30).

Mas olhando para o céu não observamos HZ's, mas sim estrelas. Tratemos delas.

3.1.4. As estrelas

Estrelas há muitas. Só na nossa galáxia podem existir cerca de 400×10^9 . Se só uma pequena fração destes sóis possuírem sistemas planetários, o número total de planetas na galáxia é, mesmo assim, enorme (Dartnell, 2007, p. 147-149).

O nosso Sol é uma estrela relativamente pequena, estável e de meia-idade. E, se calhar foi por ser tão estável que a vida apareceu. Mas estrelas semelhantes ao Sol há relativamente poucas. Não haverá outros tipos de estrelas com planetas capazes de abrigar vida?

As estrelas podem ser classificadas segundo duas características: **temperatura** de superfície e **luminosidade**. A temperatura da superfície de uma estrela reflete-se na cor da luz que emite: estrelas quentes são brancas ou mesmo azuis; estrelas frias tem cor laranja ou vermelha. Este espetro é utilizado para dividir as estrelas em classes, cada uma assinalada com uma letra. Dispostas por ordem decrescente de temperatura temos as estrelas, O, B, A, F, G, K, M, R e N (atente-se à mnemónica, **Oh Be A Fine Girl Kiss Me Right Now**). A luminosidade ou brilho de uma estrela também depende do seu tamanho: estrelas grandes possuem grandes superfícies emissoras sendo geralmente muito brilhantes. O Sol é uma estrela da classe G, amarela, relativamente fria, Sírios é uma estrela da classe A, branca, enquanto a supergigante Betelgeuse, é uma estrela da classe M (mas fora da sequência principal), vermelha fria mas muito brilhante devido ao seu enorme tamanho. E também depende da sua idade.

Uma estrela com 50% mais massa que Sol vai durar cerca de 2 Ganos o que é um tempo demasiado curto para o ritmo vagaroso e calmo com que a vida evolui na Terra. Quando uma estrela se transformar em gigante vermelha o seu brilho vai aumentar de um fator da ordem dos mil e a sua HZ vai-se modificar afastando-se dela.

De facto, quanto mais massiva é uma estrela menos tempo vive. As mais massivas possuem HZ mais vastas, mas consomem o seu combustível nuclear tão rapidamente, que duram apenas alguns milhões de anos ou mesmo centenas de milhares de anos - demasiado pouco tempo para a vida surgir num dos seus planetas. No fim explodem como supernovas, destruindo qualquer planeta interior e as luas dos gigantes gasosos. Logo, as estrelas do tipo O e B, não são geralmente consideradas capazes de suportar a vida em qualquer dos nichos potenciais descritos para o planeta Terra.

Anãs vermelhas

As estrelas menos massivas que o Sol apresentam possibilidades mais fascinantes. As anãs vermelhas da classe M, mais frias que o Sol brilham com uma fraca luz vermelha. Desde já, não é possível observar nenhuma a olho nu. Mas são muito mais numerosas que as estrelas do tipo do Sol, portanto se conseguirem suportar vida nos seus planetas do tipo rochoso então há um enorme número de oásis para a vida na galáxia. E são tão frugais na queima do seu combustível nuclear que nenhuma delas teve ainda tempo para morrer. Podem durar até triliões de anos. As primeiras que se formaram no universo primordial ainda continuam jovens hoje em dia. Assim há muitas para a vida surgir e desenvolver-se. Mas também há problemas.

Em primeiro lugar, a HZ uma estrela do tipo K, é cerca de 5 vezes mais estreita do que a HZ do Sol. Logo é um alvo muito pequeno para planetas rochosos se formarem e manterem uma orbita estável durante Ganos (Dartnell, 2007, p. 149-152).

Planetas rochosos não se podem formar a distâncias demasiado pequenas da estrela pois as poeiras existentes na nebulosa estelar não se podem agregar. E a distâncias demasiado longas, para lá da linha de neve, os embriões planetários formam-se tanto a partir do material rochoso como do material gelado e os núcleos formados tornam-se massivos tão depressa que varrem grandes volumes de gás das suas vizinhanças tornando-se planetas gigantes com superfícies impróprias para a vida.

Além disso, quando um planeta gira muito próximo da estrela, perde o seu momento angular gradualmente por efeito de maré e, em pouco tempo, fica em rotação síncrona, apresentando sempre a mesma face virada para a estrela. No sistema solar, Mercúrio e Vénus encontram-se perto deste limiar, sendo as suas rotações muito retardadas - Mercúrio dá 2 voltas ao sol enquanto roda 3 vezes sobre ele próprio e um dia de Vénus equivale a 117 dias terrestres. O caso da nossa Lua é semelhante. Para as estrelas da classe M a zona habitável encontra-se totalmente dentro deste limiar - qualquer planeta habitável fica bloqueado relativamente depressa. E para as anãs

vermelhas muito frias, a maioria da zona habitável cai fora da zona de formação dos planetas terrestres, tornando a vida quase impossível.

Um planeta com rotação síncrona tem a face perpetuamente virada para a estrela sempre iluminada e a outra sempre na escuridão. A maior parte das duas faces será completamente inóspita: uma delas, sempre quente e seca e a outra sempre muito fria em que o ar congela e neva sobre uma superfície estéril. Entre os dois extremos existirá uma região anelar, a rodear esse mundo, onde a água líquida e talvez a vida possam ser possíveis, uma espécie de zona crepuscular de onde se verá a estrela permanecer perpetuamente pendurada no horizonte. Para abrigar vida, o planeta fixado pela sua estrela necessitará de uma atmosfera espessa para redistribuir o calor que recebe. Mas há dois senãos: podem-se originar ventos terríveis, com o ar quente da face iluminada a expandir-se impetuosamente para a face na sombra (à superfície de Vénus não acontece isto); é difícil a um planeta a girar tão perto da sua estrela conseguir reter uma atmosfera espessa devido aos ventos estelares. Supõe-se que Marte perdeu a maior parte da sua atmosfera original, varrida para longe pelo vento solar. Assim, os planetas das anãs vermelhas deverão ser especialmente grandes, para agarrarem gravitacionalmente a sua atmosfera, e ter um campo magnético poderoso para defletir o vento estelar.

Mas as anãs vermelhas são muito mais ativas em flares e manchas solares que o Sol e o seu brilho pode variar rapidamente tanto como 10%. A variação da luz pode desestabilizar os sistemas de feedback do planeta sendo difícil modelar os efeitos de uma variação da luz emitida. O clima de um mundo à volta de uma anã vermelha pode oscilar entre efeitos de estufa e glaciações. Os flares também podem ser igualmente um problema para a vida superficial. Sempre que um flare atingir um mundo os níveis de UV atingem muito rapidamente picos enormes. Uma proteção adequada a um planeta necessita dum escudo de ozono mais espesso do que aquele que a Terra possui, ou doutros filtros UV tais como a névoa fotoquímica em Titã. Outro ciclo feedback pode naturalmente controlar os níveis de UV: o ozono é produzido pelos raios UV a partir moléculas de oxigénio, que podem ser libertadas tanto pela fotossíntese como pela ação dos UV em moléculas de água no ar. Então, quanto maior for o nível de UV a atingir a atmosfera de um planeta, mais ozono é produzido para o absorver. E se não houver um escudo de ozono, a vida à volta de uma anã vermelha pode encontrar refúgio debaixo do solo, dentro de rochas fraturadas ou produzindo grandes quantidades de filtros UV biológicos, como fazem os líquenes terrestres.

No entanto, nas anãs vermelhas os flares e as manchas só são suscetíveis de criar grandes problemas durante o primeiro Ganos ou à volta disso. Assim mundos do tamanho da Terra poderão continuar a ser vulcanicamente ativos o suficiente, depois deste tempestuoso período inicial, para regenerar uma atmosfera espessa isoladora e terem mais umas centenas de Ganos para a vida surgir e evoluir.

"Uma única espiga de milho num grande campo é tão estranho como um único mundo no espaço infinito. "

Metrodorus de Quios (331-278 a.C.,)

3.2. A CAÇA DOS EXOPLANETAS

A busca dos exoplanetas é uma tarefa ou mesmo um hobby muito recente. Mas revolucionária(o). A par dos extremófilos tornou uma quase incerteza - a existência de vida - numa quase certeza.

Os primeiros a ser detetados e confirmados foram três planetas, a rodar à volta de um pulsar, em 1991 (Dartnell, 2007, p.152-155). Ora, um pulsar é uma estrela muito densa que emite um feixe estreito de ondas rádio que varre o espaço à medida que a estrela roda sobre si mesma, muito parecido com o feixe de um farol. Se a Terra se situar no caminho do feixe emitido um sinal de batimento pode ser captado pelos astrónomos, um sinal muito rigoroso (pulsars estão entre os objetos mais regulares do Universo). A força gravitacional de um planeta a girar à volta dum pulsar desloca ligeiramente a sua posição, alterando a sua distância à Terra ainda que o pulsar continue a bater exatamente com a mesma taxa. Mas o tempo preciso dos pulsos varia à medida que a estrela oscila. O efeito é mínimo mas mesmo assim conseguiu ser detetado, permitindo inferir a existência desses planetas.

Embora as estrelas de neutrões sejam ideais para detetar planetas também são dos tipos de estrelas menos prováveis para encontrar vida à sua volta. Ora, estas estrelas são o resultado de supernovas. Nenhum planeta terrestre consegue sobreviver a tal cataclismo, logo os corpos que orbitem um pulsar deverão ter-se formado a partir dos detritos despedaçados deixados pela explosão estelar.

De entre os métodos utilizados destacam-se quatro indiretos - métodos do trânsito, velocidade radial, astrométrico e microlente gravitacional - e um direto - observação da imagem do exoplaneta. Na figura 16 estão esquematizados os indiretos.

O método astrométrico

É o método mais antigo para a detetar exoplanetas. Enquanto os planetas giram à volta da sua estrela-mãe o centro de massa desta move-se muito pouco relativamente ao centro de massa do sistema estelar. Considerando este fixo e analisando as

sucessivas posições descobre-se as características do movimento da estrela e através destas descobrem-se os exoplanetas. Esse movimento é bastante complexo na presença de muitos planetas. Este método necessita de medições muito precisas das posições da estrela. E com a missão espacial GAIA haverá acesso a dados de um conjunto de cerca de 10^9 estrelas.

Quando o plano da órbita faz 90° com a direção da linha de visão as variações das posições são a máximas possíveis de observar, atingindo-se o máximo de eficiência. Além disso, é o único que funciona neste caso particular: o trânsito é impossível de ocorrer e a velocidade radial é praticamente nula.

O método do trânsito

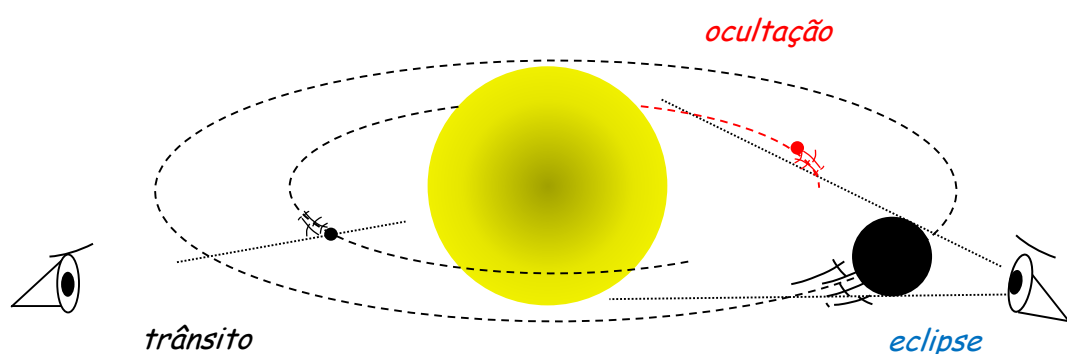


Figura 15 Diferença entre eclipse, trânsito e ocultação. Da minha autoria

Quando um corpo celeste se interpõe entre outros dois pode acontecer um de três resultados: uma *ocultação*, um *eclipse* ou um *trânsito*. Se o corpo intermediário tem uma dimensão angular semelhante ao corpo que tapa temos um *eclipse*, se surge muito maior temos uma *ocultação* se aparece muito menor temos um *trânsito*. Ocorre uma ocultação quando a Lua passa em frente a uma estrela, um trânsito quando Vénus passa em frente ao Sol e um eclipse quando a Lua se coloca em frente do sol. Nos exoplanetas ocorrem trânsitos e ocultações.

Num trânsito de um planeta à volta da estrela-mãe há uma pequenina diminuição do brilho aparente da estrela que é tanto maior quanto maior for a área do disco do planeta. Este surge negro na zona V e UV: o planeta emite radiação desprezável à temperatura da superfície da estrela e a superfície do planeta vai refletir energia só do lado virado para a estrela que neste caso é contrário ao lado da observação.

Pode-se calcular facilmente o raio do exoplaneta comparado com o raio da estrela. Basta saber a percentagem de radiação bloqueada. É um dos poucos que nos dá o valor do raio do planeta. Pode-se também obter o período do movimento e utilizando a terceira lei de Kepler pode obter-se o raio da trajetória. Quanto à massa é necessário utilizar outros métodos. O valor obtido é mesmo o valor real e não um valor mínimo.

Na prática, a observação de uma única diminuição do brilho da estrela não é suficiente para a interpretar como sendo provocada por um exoplaneta em movimento pois há muitos fenômenos que também podem provocar mudanças semelhantes nesse brilho: aparecimento de manchas estelares, estrelas binárias de eclipse ou variações aleatórias do brilho das estrelas. É necessário que essa diminuição do brilho seja observada pelo menos três vezes a intervalos de tempo iguais (é o período de translação) para se ter a certeza de que temos exoplaneta envolvido. Ora, este período é tanto maior quanto mais afastados estiverem os exoplanetas da estrela-mãe, logo este método é rápido a detetar os planetas muito próximos. Por exemplo, para um exo-astrônomo observar e concluir o trânsito de Júpiter pelo Sol seria necessário pelo menos 24 anos, logo a observação e confirmação de exoplanetas situados em órbitas da dimensão da de Júpiter só se consegue passados, no mínimo, 24 anos. É necessário nestes casos a confirmação por outros métodos. E com a ajuda destes, nomeadamente o método das velocidades radiais, consegue-se medir outros parâmetros físicos importantes. E quanto mais próximos da estrela-mãe maior é o domínio de ângulos possíveis para observar este fenómeno da Terra. E mais uma razão da maior parte das deteções terem sido feitas para planetas próximos.

A ocultação também permite a obtenção de informações. Quando um exoplaneta é tapado pela estrela, há um decréscimo na radiação total emitida pelo sistema “planeta+estrela” na zona dos IV. Como a estrela emite muito menos radiação na zona IV do espectro do que nos V ou UV e o exoplaneta emite a quase totalidade da sua radiação térmica na zona dos IV, o contraste entre os brilhos é menor nesta zona, passando de bilhões para um a poucos milhões para um. Fazendo a subtração das duas radiações obtém-se a radiação só devida ao exoplaneta. Isto permite obter a temperatura do planeta ou até detetar possíveis formações de nuvens. Além disso, a luz da estrela atravessa as camadas da atmosfera superior do exoplaneta e a observação do espectro de alta-resolução, permite detetar os elementos presentes nessa atmosfera. A polarização da luz da estrela pode também ser inferida quando a luz atravessar ou se refletir na atmosfera.

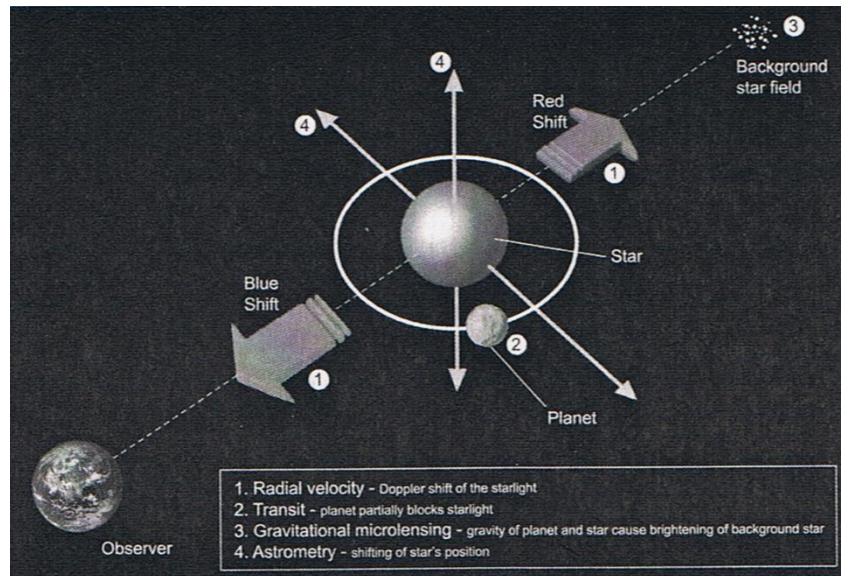
Este método é relativamente fácil de aplicar pois requer material menos sofisticado do que o método da velocidade radial. E pode ser aplicado a estrelas muito distantes. No entanto achar um trânsito num intervalo de tempo razoável requer a observação simultânea de um grande número de estrelas e em intervalos de tempo frequentes.

Até ao lançamento de telescópio espacial Kepler este método permitiu descobrir 23 % dos exoplanetas conhecidos. Com aquele em funcionamento mais de metade das descobertas.

O método das velocidades radiais

Este método baseia-se no efeito Doppler. A estrela circula à volta do centro de massa do sistema e na direção da linha do observador isso vai traduzir-se num deslocamento de frequência detetado na luz emitida. Quando a estrela se aproxima a luz é detetada com comprimentos de onda menores e quando se afasta, com comprimentos de onda maiores que os valores em repouso.

É muito semelhante ao que se passa com o som dos motores dos carros numa corrida de fórmula 1: na aproximação o som é mais agudo; ao afastamento o som torna-se mais grave.



Esta medição é efetuada diretamente no espectro detetado na estrela. A velocidade de afastamento e aproximação da estrela é muito menor do que a do planeta. As velocidades detetadas são muito baixas: 5 a 30 km.s⁻¹.

Esta medição é efetuada diretamente no espectro detetado na estrela. A velocidade de afastamento e aproximação da estrela é muito menor do que a do planeta. As velocidades detetadas são muito baixas: 5 a 30 km.s⁻¹.

Era a técnica com mais sucesso antes do lançamento do Kepler. Tem no entanto algumas limitações: só funciona bem para estrelas até 200 anos-luz de distância, e temos que dispor de telescópios de grande abertura. Só permite obter valores mínimos de massas de exoplanetas, pois não se sabe o ângulo da órbita do planeta relativamente à direção da linha de visão. E também é usada para confirmar as descobertas empreendidas através do método de trânsito.

O método da lente gravitacional

O efeito de microlente gravitacional acontece quando os campos gravitacionais de um planeta e o da estrela-mãe agem de modo a amplificar a luz de uma estrela distante que esteja no fundo do céu. Se o fundo por detrás do sistema planetário contiver muitas estrelas a probabilidade de algumas dessas luzes sofrer amplificação é maior; mas como a densidade de estrelas cresce muito para as regiões centrais da galáxia

este método promete muito. No entanto recentemente surgiu uma aplicação bem mais interessante: detecção de planetas escuros, que não rodam à volta de qualquer estrela.

Micro-lentes gravitacionais já tinham sido testadas com outros objetivos sobretudo na busca de matéria escura.

A micro-lente funciona porque a força da gravidade da estrela obriga a luz a curvar. Como a luz também curva ao passar por uma lente deu-se a este fenómeno o nome de micro-lente. A presença de um planeta em torno da estrela faz com que a luz seja curvada de forma diferente, como se fosse uma lente com pequenos riscos. Isso faz com que a intensidade da luz varie de forma distinta, permitindo detetar o planeta.

Os acontecimentos envolvendo micro-lentes são curtos, durando alguns dias ou semanas, já que as duas estrelas e a Terra movem-se uns com relação aos outros. Mais de 1000 estrelas foram observadas em eventos desse tipo ao longo dos últimos dez anos. As observações são geralmente empreendidas através de redes de telescópios robóticos.

A grande vantagem das micro-lentes gravitacionais é que se podem descobrir planetas de baixa massa (i.e. terrestres) mesmo com a tecnologia atualmente disponível. Uma desvantagem importante é que o evento não pode ser repetido, pois um alinhamento ao acaso nunca ocorre novamente.

Além do programa OGLE financiado pela NASA e pela National Science Foundation, o grupo MOA (do inglês, Microlensing Observations in Astrophysics) trabalha para aperfeiçoar dessa técnica. Os Astrónomos acreditam que seja possível observar planetas do tamanho da Terra dentro de meia década.

O método das imagens diretas

A observação direta de planetas é o mais natural dos métodos: se queremos ver alguma coisa temos de tentar... vê-la. Só que é muito problemática. Não apenas o planeta está muito perto da sua estrela para ser resolvido como a luz desta inunda completamente, ofusca a luz que é refletida por aquela. Ora, o brilho da estrela é mais de mil milhões de vezes maior do que o planeta. E estão muito distantes. É como tentar ver alguma coisa à noite com os máximos de um carro direcionados para nós. Como evitar essa luz? A natureza permite encontrar a resposta: quando a Lua se interpõe entre a Terra e o Sol nos eclipses é possível ver algumas estrelas à volta. De facto, em 1939, Lyot, criou um dispositivo - coronógrafo solar - dentro do qual um obstáculo e uma lente são colocados em frente do Sol o que permite desviar a luz do Sol e observar a luz da coroa, muito mais fraca mas espacialmente separada da luz da

fotosfera. Em 2004, Swartzlander criou o coronógrafo estelar em que um sistema de lentes desvia a luz da estrela, só aparecendo a luz refletida pelo planeta. E fez a primeira detecção de um exoplaneta.

Este método que está a começar a ser usado tem vantagens sobre os outros. Uma delas é permitir a identificação de planetas pequenos do tamanho da Terra, que poderão conter vida. A zona do espectro onde as superfícies desses planetas emitem radiação em maior quantidade e na mesma ordem de grandeza da radiação refletida é nos IV. Ora, em IV a emissão de radiações por parte de uma estrela da classe do Sol é muito menor que na parte V e UV (embora ainda seja milhões de vezes maior). Logo, o contraste entre as luzes serão menores e as observações serão otimizadas. No entanto a interferometria tem uma surpresa guardada na manga. Esses grandes conjuntos de telescópios colocados em rede de modo a imitar um grande telescópio podem ser usados com este método. Vários feixes são coletados em vários espelhos e a sua recombinação pode provocar a anulação da luz da estrela não afetando a luz proveniente dos planetas próximos. Uma alternativa ao coronógrafo.

A observação direta de um exoplaneta através da sua luz tão débil permite recolher uma enorme quantidade de informação. Variações regulares na intensidade e frequência da luz emitida podem revelar a duração do dia; em IV as terras e os mares são distinguíveis e assim, à medida que o planeta roda sobre si mesmo, aspetos da sua geografia podem ser observados, revelando a proporção de continentes e mares; a areia do deserto, gelo e a cobertura das nuvens podem também ser distinguíveis e assim algumas características do clima poderão ser aferidas; e à medida que o planeta percorre a sua órbita poderão ser detetadas variações periódicas na cobertura de nuvens e de gelo. Mas a informação mais importante a detetar é a composição química da atmosfera. E pode não a ter!.

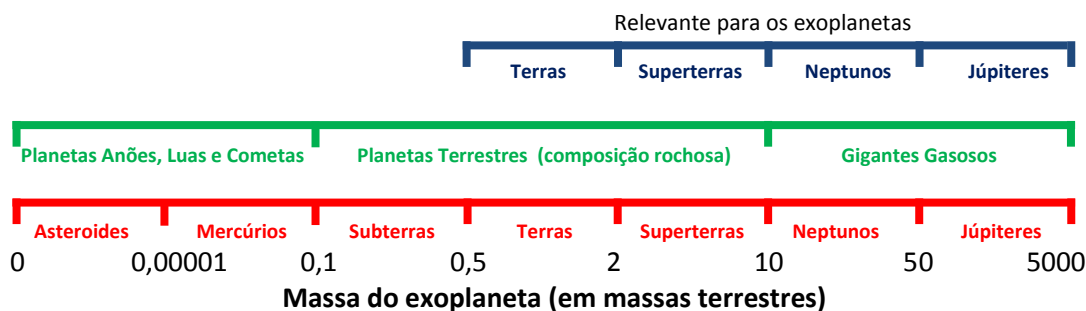
E agora... vamos aos resultados?

3.3. RESULTADOS

Até 2011 o método que mais achamentos fez foi o das velocidades radiais mas atualmente (15/08/2014) é o método de trânsito (1144 exoplanetas contra 573) que dá cartas. Até 15 de Agosto de 2014 eram conhecidos 1815 exoplanetas e 1130 sistemas planetários e destes 466 eram múltiplos. E havia 200 a aguardar confirmação.

Os planetas que se descobriram podem ser classificados comparando-os com os homólogos do Sistema Solar. E segundo vários critérios.

■ Quanto a massa há quem considere a classificação seguinte:



■ Há quem os disponha numa tabela periódica de exoplanetas como a seguinte:

	Planetas terrestres				Planetas gigantes	
	Mercúrios	Subterras	Terras	Superterras	Neptunos	Júpiteres
Zona quente	1	15	77	278	639	456
Zona tépida	-	-	8	8	16	96
Zona fria	-	-	-	-	3	66

Esta última já nos pode dar uma ideia do que foi descoberto até agora. E salta logo à vista a elevada percentagem de Júpiteres quentes.

3.3.1. Júpiteres quentes

A maior parte dos exoplanetas descobertos são maiores que Neptuno. Mas isto acontece apenas porque são mais fáceis de detetar que os mais pequenos. Além disso, giram muito próximo das suas estrelas-mães logo as temperaturas de superfície são muito elevadas. Ora, estes planetas são designados por “Júpiteres quentes” e a sua existência real é um verdadeiro puzzle. A teoria padrão da formação dos planetas gigantes não prevê que estes se formem dentro da linha de neve, tão próximo da estrela-mãe. Como explicar? (Dartnell, 2007, p. 155-156).

Uma hipótese é os planetas formarem-se afastados da estrela-mãe para lá da linha de neve, mas depois migraram para órbitas mais apertadas. Esta migração planetária pode ser desastrosa para alguns planetas interiores que se estejam a formar, impedindo a sua existência na HZ. A perturbação gravitacional criada poderá alterar as suas órbitas radicalmente, arrastando-os para uma colisão ou atirando-os eternamente para o espaço vazio interestelar ou até fazendo-os mergulhar frontalmente na sua estrela. Há evidências, baseada na presença de elementos pesados na atmosfera de estrelas, de planetas terem sido engolidos pelo seu próprio sol.

Além disso, mesmo para um planeta gigante que esteja na HZ do seu sol a sua superfície deve ser completamente inóspita. Mas para quaisquer luas que orbitem esses planetas gigantes transportadas para perto do calor da estrela, abrem-se possibilidades fascinantes. No entanto, para estas luas deslocadas serem habitáveis deverão satisfazer os mesmos requisitos postos aos planetas. Primeiro, o planeta gigante terá de permanecer estável durante Ganos na HZ; segundo, não deverá ter uma órbita muito excêntrica para não provocar oscilações climáticas graves. As fontes de energia não parecem ser fatores limitantes já que podem ser aquecidos por dentro, devido a forças de maré dos seus gigantes gasosos e por fora, pela estrela tornando a autotrofia tanto à volta das fontes hidrotermais como através da fotossíntese, abundante. E porque as luas foram formadas para lá da linha de neve antes de serem arrastadas para dentro, trazem consigo as substâncias voláteis, tanto as moléculas orgânicas como os ingredientes para formar oceanos e atmosferas. No entanto, estas até poderão estar em demasiada quantidade: por exemplo, Ganimedes e Calisto são compostas por, pelo menos, 50% de gelo de água; se Júpiter tivesse migrado em direção ao Sol para a sua HZ, isso teria derretido todo o gelo formando-se um oceano de mais de 100 km de profundidade. A pressão esmagadora na base desse tal oceano poderia ter impedido a vida de se manifestar á volta de qualquer fonte hidrotermal e mesmo que as bactérias fotossintéticas pudessem deslocar-se alegremente através das águas superficiais, não é muito claro se a química pré-biótica poderia, alguma vez, produzir vida nessas circunstâncias. O termostato climático da Terra, o ciclo carbonato-silicato também não poderia funcionar numa lua sem superfície sólida. Outro problema surgiria para as luas em rotação síncrona. Estando sempre com a mesma face virada para o planeta gigante, o seu período de translação seria igual ao seu período diurno. Logo numa translação toda a superfície experimentaria os raios estelares durante metade de período e a noite durante a outra metade. Se este período fosse longo poderíamos ter uma situação próxima da apresentada por um planeta em rotação síncrona à volta duma anã vermelha. No entanto, no caso de essa lua ter uma atmosfera espessa, o calor poderia ser redistribuído pelas duas faces mais rapidamente, mas para segurar uma atmosfera destas seria necessário que a sua massa fosse pelo menos três vezes maior que a apresentada por Ganimedes (Dartnell, 2007, p. 158). Mas nenhum destes problemas é crítico e portanto a possibilidade de haver vida nessas luas é fascinante.

Dantes pensava-se que os planetas apenas se poderiam formar á volta de estrelas solitárias. O nosso Sol é um caso único não estando ligado a mais nenhuma outra estrela. Contudo, dois terços das estrelas na galáxia têm pelo menos uma

companheira; por exemplo, a estrela mais próxima do Sol, Próxima de Centauro, faz parte de um sistema triplo. Ora, os astrónomos já estudaram os tipos de órbitas que podem ser estáveis no interior de sistemas binários de estrelas. Assim um planeta pode orbitar muito perto de uma das estrelas e relativamente longe da outra (tal como a Lua gira á volta da Terra e não é muito afetada pelo Sol no seu movimento) ou girar num grande círculo à volta de ambas as estrelas fortemente ligadas, portanto muito afastada de ambas as estrelas. Órbitas com a forma de um oito á volta de ambas não são permitidas, pois levariam á ejeção do planeta para fora do sistema ou a acreção do mesmo por uma das estrelas. Aliás isto é parecido com o que se passa com as falhas de Kirkwood na cintura dos asteroides. Júpiter não permite que existam asteroides nessas órbitas mas pastoreia esses asteroides para outras órbitas. Contudo, no caso de um binário de estrelas o número de órbitas pastoreadas possíveis será bastante menor. Além disso, a grande maioria dos binários têm órbitas muito excêntricas o que torna muito difícil a existência de outros corpos a rodar à sua volta. Só se estiverem muito perto de uma das estrelas ou muito longe de ambas. Já há exemplos destes exoplanetas. Além disso, os modelos preveem que estrelas gémeas de baixa massa sejam tão boas ou mesmo melhores para albergar vida nos planetas á sua volta do que estrelas solitárias, porque a sua energia combinada torna maior a zona habitável à sua volta. Ora, por ser maior minimiza alguns dos perigos enfrentados pelos planetas á volta de uma estrela solitária. A maximização acontece para binários de massas 80% a massa do Sol muito perto uma da outra (Redd, 2013).

O aspeto mais intrigante em todos estes sistemas estelares situa-se no facto de serem muito diferentes do nosso. Ora isto não se deve a uma questão de sorte peculiar mas mais aos métodos utilizados para os detetar. As técnicas descritas atrás apenas detetam um planeta pelo seu efeito na luz, posição e velocidade da sua estrela-mãe. E a sensibilidade do equipamento apenas detetam grandes planetas a girar muito perto da estrela. Além disso, quanto mais afastado um planeta girar à volta de uma estrela tanto mais tempo demora a dar uma volta. Por exemplo Saturno demora trinta anos a dar uma volta ao Sol e é necessário a um astrónomo pelo menos observar durante trinta anos para ter a certeza da massa e órbita deste planeta. Igualmente, os astrónomos ainda não tiveram tempo suficiente para observar os planetas que orbitam longe da sua estrela-mãe nos outros sistemas estelares (Dartnell, 2007, p. 160).

Um aspeto muito interessante destas descobertas é o facto de se encontrarem os *planetas escuros*. Assim surge mais um potencial nicho para existir e propagar vida.

3.3.2. Levantando o véu da noite

Nos anos setenta, passou pelos ecrãs de televisão uma interessante série de ficção científica que ficou na memória de muitos de nós: Espaço 1999. Uma explosão nuclear de resíduos radioativos acumulados na Lua atirou-a da sua órbita para o espaço.

Ora, esta ideia de um planeta passear pelo espaço livremente, já deixou de fazer só parte da nossa imaginação. A possibilidade de um planeta ser retirado da sua órbita é não só possível como parece ser frequente neste nosso imenso e fascinante Universo. Inclusive poderá já ter acontecido no nosso Sistema Solar. E não é necessário nenhuma explosão. Há muitos “lançadores de martelos” gigantescos à nossa volta que não precisam de energia nuclear para nada. Basta a força gravítica. A realidade prepara-se, neste caso, para encandear a ficção... e estimulá-la também.

Levantamentos deste tipo de corpos celestes designados por exoplanetas vagabundos, nómadas, órfãos, errantes, interestelares, de flutuação livre, negros ou escuros, têm sido feitos por microlentes gravitacionais e poderão levar à reformulação do conceito de planeta. Estudos já feitos abrem inúmeras possibilidades de haver mundos muito estranhos mas incríveis. A distribuição em massa da sua população segue leis exponenciais: quanto menor a massa, maior é o seu número.

De facto, estima-se que por cada estrela da sequência principal existam cerca de 50 júpiteres escuros, 1000 terras escuras ou 100 mil objetos escuros com massas semelhantes à da Lua (Eubanks, 2013). Com estas populações, estima-se que a mais próxima “Lua escura” deverá encontrar-se a 0,1 a.l. da Terra, a “Terra escura” a 0,5 a.l. e o Júpiter escuro a cerca de 3 a.l. São mesmo MUITOS!

Mas como é que surgiram tantos planetas de flutuação livre?

Podem ser o resultado de migrações planetárias já descrito atrás. É semelhante ao que se passa com uma nave espacial que utiliza a força gravitacional de um planeta para sofrer um impulso e seguir viagem com maior rapidez. Só que neste caso temos um planeta em vez de uma nave. E quanto menor for um corpo celeste mais facilmente pode sofrer esta sorte. Aliás, foi o que aconteceu no nosso próprio sistema solar na época da migração planetária. Pode-se até inferir: se Saturno fosse mais massivo ou estivesse mais próximo de Júpiter a interação entre os dois seria diferente e num jogo de longa duração gravitacional do gato e do rato poderia levar um deles a ser expulso para o espaço. Se fosse Saturno a ser expulso, Júpiter ficaria aprisionado numa órbita estranhamente mais elítica. Ora, alguns dos gigantes recentemente descobertos à volta de outras estrelas têm órbitas altamente elíticas, e a ejeção de um “colega” há muito perdido poderá ter sido a causa. Também podem nascer a partir de nuvens de gases e poeiras como uma estrela - neste caso designam-se por sub-anãs

castanhas. Outra hipótese é a de serem ejetados para o espaço quando uma supernova explode. Ora, isto é incrível, mas há uma certa probabilidade dos planetas mais afastados da estrela moribunda não serem totalmente destruídos e o que sobra é atirado violentamente para o espaço.

Apesar de parecer, à primeira vista, uma sentença de morte para a existência de vida, a ejeção de um planeta do seu sol central poderá não ser assim tão catastrófica. Ora um planeta escuro não tem estrela, logo a energia luminosa que recebe é desprezável. Assim a sua superfície pode atingir temperaturas próximas do zero absoluto e durante Ganos só se avistarem estrelas numa noite humanamente eterna. No entanto, dentro desses planetas pode haver fontes de calor internas suficientes para apoiar uma biosfera por períodos comparáveis à idade do sistema solar. Uma delas pode ser o decaimento de elementos radioativos (não depende da temperatura). Logo, o interior é quente e havendo uma atmosfera, se a velocidade com que perdem esse calor for diminuta ou houver um efeito de estufa eficaz, o calor acumula-se e as temperaturas à superfície podem ser bastante altas. Também pode acontecer que a existência de uma camada superficial gelada e boa isoladora permita a formação de um oceano líquido interior. E até terem campos magnéticos (Ward & Brownlee, 2004, 21-22).

E se tiverem luas? Então estamos perante um caso especial. A juntar ao calor radioativo temos novamente o calor que se forma devido às forças de maré. E sendo massivas também podem abrigar vida. Por exemplo, imaginemos que Júpiter e as suas luas galileanas são ejetadas para o espaço interestelar. Ora, se dentro de Europa existirem micróbios eles provavelmente irão continuar a viver e a evoluir. Senão vejamos. Europa está a uma distância 5 vezes maior do que a Terra do Sol logo só recebe $1/25$ da radiância recebida pela Terra, o que resulta numa temperatura superficial próxima de uns enregelantes 150 K. Isto significa a inexistência de vida na superfície. Mas o seu interior profundo não é minimamente tocado pela luz solar. É como se estivesse no espaço interestelar longe de qualquer estrela. Em termos de vida, tudo ficaria na mesma, pois no frio espaço interestelar as forças de maré continuariam a atuar gerando calor suficiente para Europa manter no seu interior, um oceano líquido. Se calhar a análise de luas à volta de planetas situados muito longe do Sol pode permitir prever situações deste género e servirem de modelo a mundos vagabundos. A luz recebida é tão ténue que é como se não existisse.

A viajar pelo espaço esses planetas podem ser capturados por outras estrelas e fazerem parte de um novo sistema estelar ou serem capturados por um buraco negro. E podem também girar à volta do centro da galáxia como fazem os sistemas estelares.

Neste caso, como que giram na pista de dança galáctica só que fazem-no individualmente e não em grupo. Pode também acontecer que dois planetas nómadas se encontrem e acabem por formar um sistema binário - uma espécie de par de planetas solitários girando romanticamente em torno um do outro no vazio do espaço. E se tiverem vida pode-se por a hipótese de a transportarem pela galáxia toda.

Pelo facto de se poderem encontrar tão perto da Terra podem ser os primeiros alvos de viagens interestelares. E podem ser também detetados por observação direta na zona dos infravermelhos onde podem naturalmente emitir radiação sem terem uma estrela próxima a mascarar tudo.

Há, no entanto, uma razão muito importante para o seu estudo ditada pela segurança da Humanidade. Se um “corpo” destes abalroar a Terra a vida pode deixar de existir. Acontecerá então o Armagedão.... É muito pouco provável mas pode acontecer. É necessário fazer uma vigilância e não abusar da sorte. Já foram detetadas em sistemas estelares próximas colisões titânicas entre planetas. Em 11 de Agosto de 2009 o telescópio Spitzer captou uma colisão entre um corpo celeste do tamanho da Lua com outro de tamanho de Mercúrio junto da estrela HD 172555, uma jovem com 12 milhões de anos de existência localizada a cerca de 100 anos-luz da Terra, ao sul da constelação do Pavão. Isto faz lembrar a colisão que formou a Lua... Mas também pode ter acontecido simplesmente um choque entre dois corpos celestes dentro de um sistema estelar recém-formado (NASA, 2009, October 08).

3.3.3. Casos interessantes

Dento dos mundos já detetados há alguns que se destacam pelas suas características invulgares. Eis dois deles: WASP - 17b, descoberto em 2009, tem metade da massa de Júpiter mas um raio 1,9 vezes maior o que dá uma densidade inferior a 1/10 da de Júpiter (metade da densidade da cortiça). Além disso, tem um movimento de translação retrógrado relativamente à rotação da estrela hospedeira, demorando 3,7 dias a dar uma volta a uma distância que varia de 6,5 a 8,5 milhões de km, sendo esta órbita muito elítica responsável por enorme stress de maré que lhe aquece muito o interior. É este calor interno combinado com a energia que recebe da sua estrela que é responsável pelo seu enorme inchaço (exoplanet.eu, 2009). Outro planeta, está tão perto da sua estrela hospedeira que lhe cede matéria à taxa incrível de uma massa de Júpiter por cada 10 milhões de anos e a sua atmosfera é dominado por compostos de carbono.

Já foram descobertos cometas noutros sistemas estelares (SPACE.comStaff, 2013). E discos de gases e poeiras á volta de estrelas com alguns planetas bem identificáveis.

Um planeta, Kepler-22b, está situado na zona habitável da sua estrela, Kepler-22, da classe G, parecida com o Sol, a 600 anos-luz da Terra. É uma super-terra com um raio 2,4 vezes o do Sol, e se o efeito de estufa atua lá como atua na Terra a sua temperatura média de superfície é de 22 °C (fig. 17). O período orbital é de 289 dias.

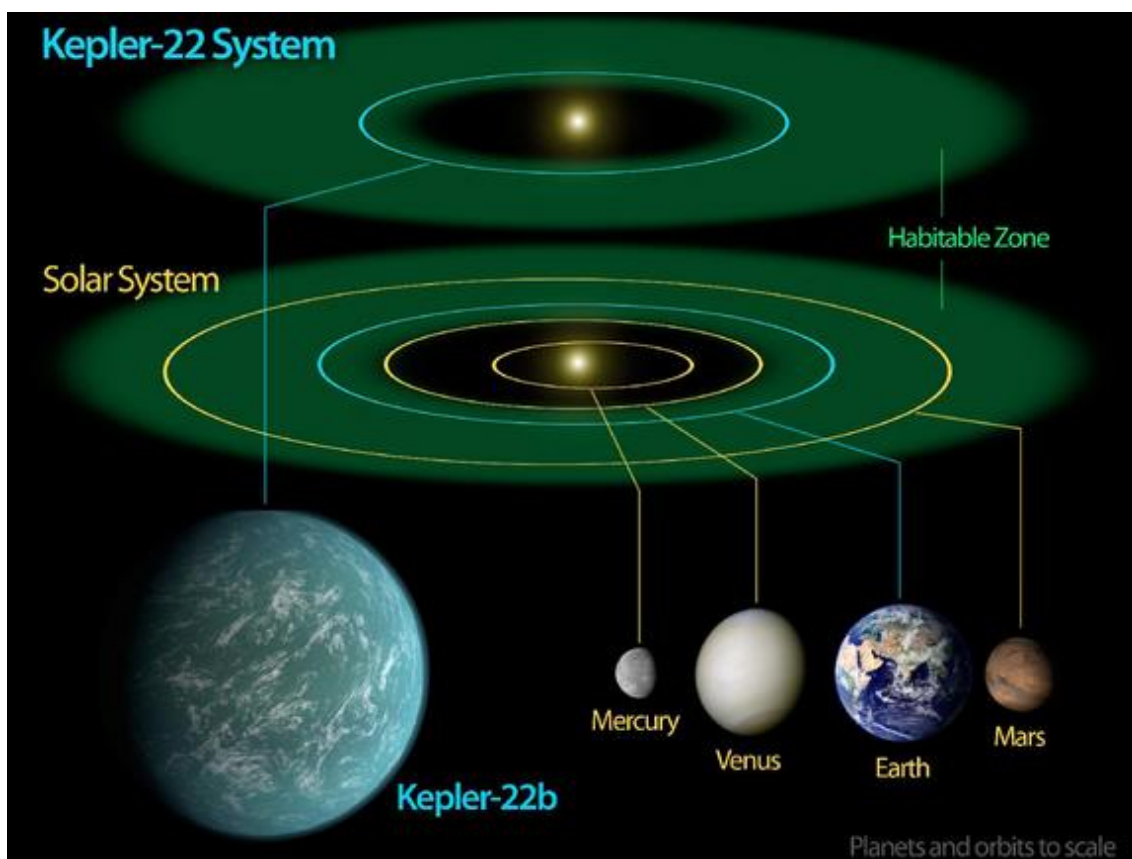


Fig. 17 Este diagrama compara o nosso sistema solar com o sistema estelar, Kepler-22, contendo um planeta, Kepler-22b situado na sua zona habitável. Fonte: SPACE.COM, NASA telescopes confirms alien planet in habitable zone, 11 Dezembro 2011

Outros planetas também nas suas zonas habitáveis:

Gliese 581-d é uma super-terra, com uma massa de 6,98 vezes a massa da Terra que orbita a estrela Gliese 581, da classe M3V, situada a uma distância de 20,3 anos-luz da Terra. Sabe-se que se encontra na zona habitável da sua estrela, com um período de translação de 67 dias. O planeta recebe da sua estrela só 30% da intensidade da luz solar na Terra o que pode significar que é muito frio. Pensa-se no entanto que este planeta é muito massivo e com aquecimento de marés desprezável pelo que não parece ter tectónica de placas, mas pode ter aquecimento radiogénico um pouco maior

que o esperado. No entanto, um estudo realizado por uma equipe francesa revelou que este planeta tem potencial para ser habitado, pois terá uma atmosfera densa rica em CO₂, com capacidade de efeito de estufa e temperaturas que permitiriam a existência de água líquida (Wall, 2011, SPACE.com).

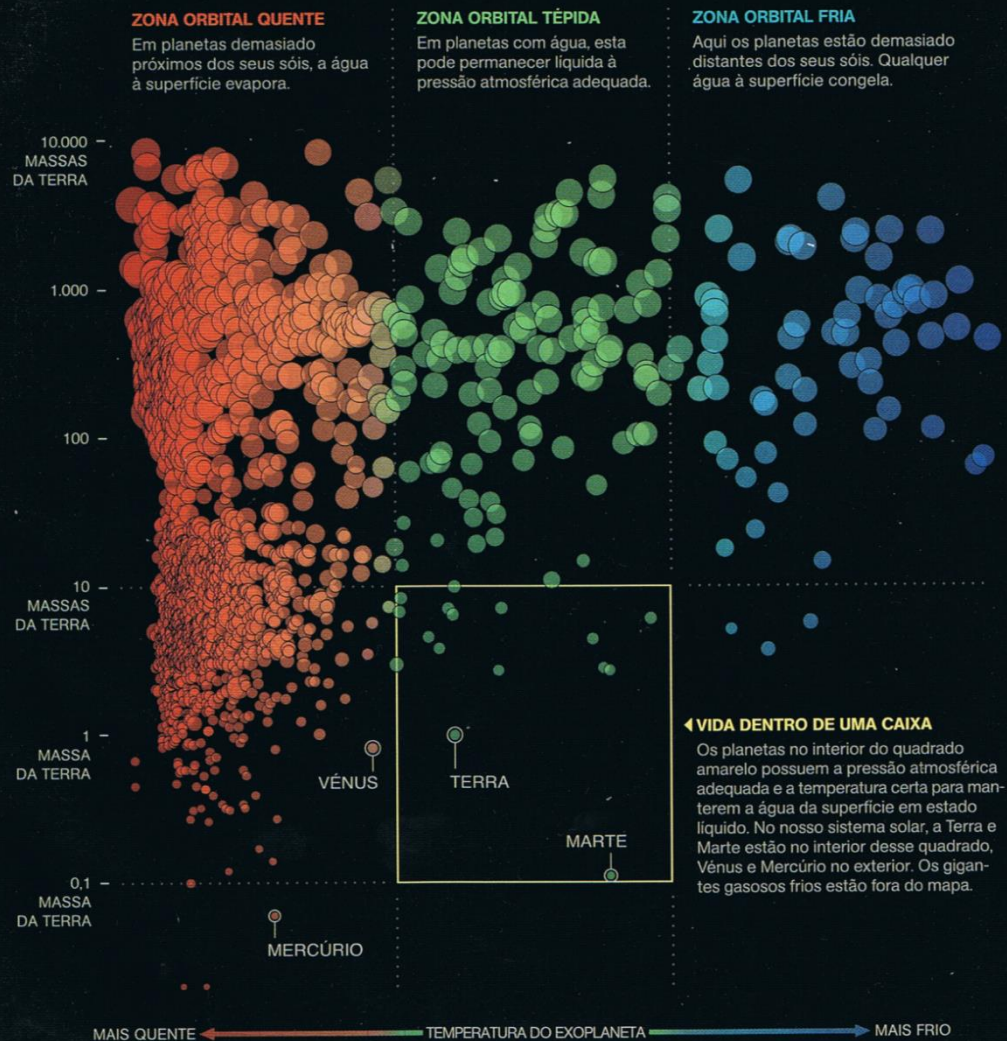
Gliese 370 b (ou HD 85512 b) gira em volta de uma estrela situada a 36 a.l. da Terra a uma distância de 0,26 UA, mas como a estrela é menor e mais fria que o Sol, encontra-se dentro da sua zona habitável com um período de translação de 54 dias. A órbita é circular o que faz com que a temperatura esteja estabilizada. Além disso possui uma massa de 3,6 vezes a massa da Terra, logo será um planeta rochoso.

Gliese 667 Cc orbita uma estrela situada a 22 a.l. de distância, pertencente a um sistema estelar triplo e com baixa metalicidade, conhecida como Gliese 667. Tem 4,39 vezes a massa da Terra e está na zona habitável com um período de translação de 28 dias. De facto, a estrela é uma anã vermelha fria mas o planeta está muito perto desta. Prova-se com isto que os planetas rochosos se podem formar á volta de estrelas de baixa metalicidade (Tate, 2013, SPACE.com).

Já se descobriram planetas escuros ou vagabundos. Um deles, o Wise 0855-0714, tem de 3 a 10 massas de Júpiter e uma temperatura de superfície de 225 a 260 K e situa-se acerca de 7 a.l. de nós (Clavin & Harrington, 2014, NASA). Um dos mais próximos corpos celestes do nosso sol (ver anexo 4). E anãs castanhas que não são estrelas mas também não são planetas como a Gliese 229b e a WISE 1049-5319 (esta uma binária)

Mundos Goldilocks: talhados para a vida?

Entre os 1.771* planetas com existência confirmada fora do nosso sistema solar, 14 situam-se na zona habitável da sua estrela, onde as condições não são nem demasiado quentes nem demasiado frias para sustentar a vida. O tamanho também é importante: um planeta demasiado pequeno não consegue manter uma atmosfera; um demasiado grande terá uma atmosfera esmagadora.



*ATÉ 17 DE MARÇO DE 2014

JOHN TOMANIO. FONTE: ABEL MÉNDEZ, LABORATÓRIO DE HABITABILIDADE PLANETÁRIA, UNIVERSIDADE DE PORTO RICO EM ARECIBO

Fig.17 Mundos Goldilocks: talhados para a vida? Os mundos semelhantes à Terra estão colocados dentro de uma caixa. Fonte: Abel Mendez, Laboratório de Habitabilidade Planetária, Universidade de Porto Rico em Arecibo. Retirado da Revista National Geographic, Julho de 2014

4. Missões espaciais

A aventura humana no espaço é talvez o mais extraordinário empreendimento do século XX. É comparável à dos descobridores com muitos sucessos mas também com falhas. Entre elas perdas de vidas. Mas não terminará jamais pois o destino da Humanidade é expandir-se para o espaço. Está nos nossos genes. É um pormenor da reprodução como característica da Vida (Sotin, Grosset & Tobie, 2009, 29-38).

4.1 HISTÓRIA DA EXPLORAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

O início da exploração espacial aconteceu em 4 de Outubro de 1957, com o lançamento do *Sputnik*, o primeiro satélite da era espacial. Essa esfera metálica foi colocada em órbita à volta da Terra pela União Soviética e deu o início à observação da Terra a partir do espaço, e depois, à de outros planetas do sistema solar.

Dois anos após o *Sputnik*, *LunaA* tirou as primeiras fotos da face oculta da Lua. Depois os anos 1960-1970 foram marcados pelas primeiras missões de exploração de Marte e Vénus assim como pelo programa *Apolo* da NASA que permitiu recolher muitas centenas de kg de amostras de rochas lunares e de as estudar no laboratório. Nos anos 1970-1980 com os seus programas *Mariner* e *Venera*, os americanos e os soviéticos estudaram Marte e Vénus realizando as primeiras órbitas e aterragens nesses dois planetas que são os mais próximos da Terra tanto na distância como nas suas características gerais. *Mariner-10* realizou o primeiro sobrevoo de Mercúrio em 1973 e as sondas *Voyager 1* e *Voyager 2* foram lançadas na sua extraordinária viagem em direção ao sistema solar exterior em 1977. Após um período de crise de uma dezena de anos, a exploração espacial foi retomada em finais dos anos oitenta com uma vontade real de explorar o conjunto do sistema solar, desde Marte até aos objetos transneptunianos, com objetivos tão variados como estudar as poeiras planetárias ou as magnetosferas dos planetas gigantes.

4.1.1 As observações efetuadas a partir da Terra

A observação dos planetas não esperou pelo *Sputnik*. Depois de muitas centenas de anos, os astrónomos começaram a utilizar os telescópios para descobrir os planetas e seus satélites, os asteroides e os cometas. Associados a estes estão os nomes de Galileu, Huyghens, Cassini e Kuiper que contribuíram para o conhecimento do nosso meio planetário. Permitiram obter informações sobre as atmosferas dos planetas, sobre as suas superfícies quando a sua atmosfera não era opaca à luz solar e sobre certas características das suas órbitas. Ora, para que a sua resolução fosse cada vez melhor os telescópios foram sendo construídos cada vez maiores. Contudo um limite é

imposto pela turbulência atmosférica que afeta a qualidade das imagens obtidas nos telescópios. Os lugares menos turbulentos permitem obter uma resolução de 0,5" de arco. Esta resolução corresponde a 20 km em Marte ou à volta de 400 km em Saturno. Com isto verificamos que as missões espaciais são indispensáveis para permitir estudar as superfícies planetárias ou objetos geológicos com tamanhos que passam de quilómetros para metros. Uma revolução tecnológica surgiu com a alta resolução angular obtida a partir das óticas adaptativas que corrigem a turbulência atmosférica empurrando os limites da resolução para mais longe permitindo assim a descoberta de novos objetos. As observações telescópicas continuam-nos a proporcionar descobertas fundamentais. Nos últimos anos, permitiram entre outras as descobertas de objetos transneptunianos, situados na cintura de Kuiper.

4.1.2 A exploração de Marte

A exploração de Marte foi interrompida a seguir aos resultados negativos da missão *Viking* encarregada de encontrar sinais de vida à superfície do planeta vermelho, numa época em que se acreditava firmemente na existência de vida bacteriana à sua superfície. A missão seguinte foi soviética (*Phobos*) mas o contacto com um dos dois orbitadores perdeu-se durante o trajeto entre a Terra e Marte e o segundo, depois de uma colocação em órbita perfeita deixou de funcionar após dois meses de Janeiro a Março de 1989. Essa falha é seguida pela perda da missão *Mars Observer* da NASA logo que entrou em órbita de Marte em 1992. Essa missão era muito ambiciosa com os instrumentos que deveriam determinar a composição química da superfície, a topografia, a composição atmosférica e a interação atmosfera-vento solar. O objetivos continuaram a ser uma prioridade para a comunidade, e a NASA decidiu repartir a carga científica do *Mars Observer* em três novas missões mais leves que foram *Mars Global Surveyor* (1996), *Mars Climate Orbiter* (1999) e *Mars Odyssey* (2001). Entretanto a missão russa com forte participação europeia *Mars96* caiu no Pacífico e a agência espacial europeia decidiu realizar a missão *MarsExpress* (2003).

O fim do século XX marca um retorno a Marte com uma participação internacional alargada uma vez que não só a Europa se lança no estudo de Marte, mas também o Japão com a missão *Nozomi*, que, depois de muitas deceções, não consegue entrar em órbita em torno deste planeta. A missão *MarsExpress* é a primeira missão da Europa para colocar em órbita um satélite artificial em torno de um planeta além da Terra. Mas a exploração de Marte não é fácil. Se *Mars Global Surveyor* consegue resultados notáveis, entre os quais a descoberta de um campo magnético residual e a cobertura global da topografia com uma precisão métrica, *Mars Orbiter Climate* é outro

revés com a perda não só do módulo de aterragem mas também do veículo orbital. Mais uma vez, decidiu-se repetir as missões para alcançar os objetivos científicos da missão perdida: *Mars Reconnaissance Orbiter* (2005) e *Phoenix* (2007), a primeira missão do programa americano, "*Scout*".

Apesar de muitas falhas no programa de exploração de Marte, o planeta continua a ser o mais estudado de todos, devido ao seu grande interesse científico para compreender a formação e evolução dos planetas telúricos. A questão da vida em Marte ainda continua um tema atual como o demonstraram três debates muito vivos no início de 2000 acerca da origem biológica dos minerais carbonatos no interior do meteorito marciano ALH84001. Da mesma forma, os problemas da história da água em Marte e habitabilidade do planeta no passado estão no centro de muitos debates científicos atuais.

Em 2009, *Mars Odyssey*, *Mars Express*, *Mars Reconnaissance Orbiter* e os dois rovers *Spirit* e *Opportunity* continuam a explorar Marte. O papel dos rovers é importante pois permitem a calibração e a verificação dos conhecimentos adquiridos pelos instrumentos em órbita. A complementaridade entre as experiências em órbita e experiências no solo está particularmente bem demonstrada na determinação da composição mineralógica da superfície. No Verão de 2007, a missão da NASA, *Mars-Phoenix* foi lançada para pousar perto do Pólo Norte de Marte e analisar o subsolo a altas latitudes. Um dos objetivos era encontrar o gelo superficial e analisá-lo. Esta missão retoma os objetivos da missão *Mars Polar Lander*.

4.1.3 Exploração dos outros objetos telúricos

A Lua foi muito naturalmente o primeiro astro a ser visitado pois é o que está mais perto. De facto, foi muito estudado pelas missões do programa Apollo. Até agora é o único objeto no sistema solar, além da Terra, onde foram colocados sismógrafos que demonstraram que a Lua tinha uma atividade sísmica gerada pelas marés Terra-Lua. Muitas missões orbitais foram lançadas para cartografar a superfície da Lua e saber a sua topografia e caracterizar o seu campo de gravidade. Entre essas missões figura a missão da ESA, *Smart-1*, que utilizou o nosso satélite natural para demonstrar a viabilidade de propulsão iónica. Nos últimos anos, muitas agências espaciais começaram a sua atividade de exploração lunar podendo-se referir, os japoneses com o programa *Selene*, os indianos com *Chandraay'an* e os chineses com o *Chang'e1*. A agência japonesa Selene criou a missão *Kaguya* lançada em Setembro de 2007 por um lançador japonês H-II. Esta missão tem 14 instrumentos a bordo.

Tabela: Missões da exploração de Marte passadas e que ainda se encontram em atividade

Missão	Período	Agência	Contributos científicos e tecnológicos
Mariner	1965-1970	NASA	Sobrevoo e colocação em órbita
Viking: orbitador + módulo de aterragem	1976-1980	NASA	Nenhum vestígio de vida à superfície
Mars Phobos	1988-1989	URSS	Trimestre de sucesso ou fracasso. Primeira câmara hiper-espectral
Mars Observer	1992	NASA	Falha
MARS96	1996	Rússia	Falha
Mars Pathfinder	1996	NASA	Demonstração tecnológica dos rovers
Mars Global Surveyor	1996-2007	NASA	Altimetria, campo magnético, imagens de alta resolução
Nozomi	1996 -	JAXA	Atmosfera, magnetosfera e superfície. Chegada ao ambiente de Marte em 2004, mas falha na colocação em órbita
Mars Climate Orbiter + módulo de aterragem polar + DS2	1998	NASA	Falha de vários componentes da missão
Mars Odyssey: orbitador (Gamma Ray + IR)	2001	NASA	Hidrogénio junto à superfície. Carta da distribuição dos elementos.
Mars Express: orbitador + módulo da aterragem Beagle II	2003	ESA	Cartas mineralógica e cartas estereográficas da superfície. Falha no Beagle II.
Mars Exploration Rovers	2003	NASA	Descoberta da hematite e de outros minerais hidratados.
Mars Reconnaissance Orbiter:	2005	NASA	Composição atmosférica de Marte. Geologia da superfície. Composição mineralógica com alta resolução espacial.
Phoenix: módulo de aterragem perto do polo norte de Marte	2007-	NASA	Análise do subsolo perto do polo Norte onde o gelo deve estar presente.
Mars Science Laboratory	2011-	NASA	Rover a decorrer - objetivos exobiológicos
Scout Mission	2011-	NASA	Orbitador atmosférico a decorrer
ExoMars	2016 -	ESA	A decorrer - perfurador - pesquisa de moléculas orgânicas + pacote geofísico

Como tarefas, obtém informações sobre a composição química e mineralógica da superfície lunar, produz um mapa topográfico e da gravidade da lua e outros estudos lunares. Na realidade, não há atualmente nenhuma questões científica real que justifique uma exploração sustentada da Lua no futuro. No entanto, questões de tecnologia, criar ciência a partir de Lua e sobre a Lua, e especialmente, as muitas implicações económicas, políticas e estratégicas de um possível retorno à Lua, justificam provavelmente a génese de novos programas ambiciosos. Este é certamente o que se parece estar a desenhar no horizonte para lá de 2020. Quanto a questões de vida, poder-se-ia verificar se todo o material que o Homem lá colocou possui restos de seres vivos que ainda possam estar vivos, ou seja estudar o seu comportamento.

O nosso conhecimento geológico de Vénus deve-se principalmente à missão soviética *Venera* e à missão da NASA, *Magellan*, que esteve para não se realizar. Inicialmente os norte-americanos quiseram enviar uma grande missão para fazer um mapa de Vénus e tentar encontrar respostas a outras questões que os cientistas pudessem ter sobre o planeta, mas o projeto era caro e foi cancelado pela administração Reagan no início dos anos 80. Uma vez que algumas partes essenciais já tinham sido construídas, um grupo de engenheiros astuciosos apercebeu-se de que ainda podia construir uma nave espacial para ir a Vénus e fazer muita ciência por muito menos dinheiro, se pedissem outras peças importantes a outros sítios. E tiveram que procurar muito. No final resultou a nave *Magellan*, construída a partir de peças sobressalentes das missões *Voyager*, *Ulisses* e *Viking* e até incluiu algumas peças trazidas do Museu Nacional do Ar e do Espaço dos EUA. A nave ficou conhecida como a “bela em segunda mão” e a missão foi classificada por alguns como “a missão das peças sobressalentes”. E os resultados foram de facto, notáveis, pois a nave estava equipada com um radar altímetro e um radar de imagem, conseguindo-se fazer o mapa de 98% de Vénus com uma resolução de 100 m. E teve que ser por radar porque a atmosfera não deixava ver a superfície em raios visíveis. E os resultados foram usados como fonte de pesquisa por muitos anos (McNab & Younger, 1999, p.87-88).

Graças à missão *VenusExpress*, a Europa também participa na exploração de Vénus que é o planeta mais semelhante à Terra em termos de massa e raio. Mas as condições de pressão e temperatura na superfície tornam-no menos interessante que o planeta Marte quanto a questões de habitabilidade. A missão *VenusExpress* da Agência Espacial Europeia está a estudar a atmosfera de Vénus. Não sendo equipado com um radar como o seu antecessor *Magellan*, ele não fornece imagens da superfície venusiana. No entanto, espectrómetros de IV a bordo permitem perfurar a atmosfera em certas janelas óticas. Esta missão foi preparada em conjunto com a *Mars Express* e o seu baixo custo está relacionado com a utilização da mesma plataforma de transporte.

Mercúrio é o planeta menos explorado no sistema solar interior. Após o sobrevoo geral do planeta pela *Mariner 10*, nenhuma missão foi programada para o estudar em detalhe.

Isso está em vias de mudar por causa de duas missões: *Messenger* (NASA) e *BepiColombo* (ESA). *Messenger* tem estudado Mercúrio desde 2008. Foi o primeiro satélite a entrar em órbita à volta deste planeta. Entre as suas prioridades figura a análise do seu campo magnético, mas também a composição mineralógica da sua

superfície. No entanto, a cobertura espacial do planeta só será parcial. *Bepi-Colombo* constituída por duas sondas orbitais, deverá chegar a Mercúrio em 2019. Esta missão irá fornecer uma cobertura completa do planeta com uma resolução maior do que a do *Messenger* por causa de sua órbita ser praticamente circular e fornecer a primeira estimativa das abundâncias elementares dos minerais da superfície.

4.1.4 O sistema solar exterior

A exploração do sistema solar exterior começou no fim da década de setenta com os *Voyagers* que forneceram os primeiros dados de alta resolução das redondezas de Júpiter e Saturno. Em 1996, a nave espacial *Galileo* chegou ao sistema de Júpiter e tem fornecido desde então uma enorme quantidade de dados sobre Júpiter e suas luas. Estes incluem, entre outros, a descoberta de campos magnéticos, a determinação das estruturas internas das luas, a caracterização da magnetosfera de Júpiter e ionosferas e a possível existência de oceanos líquidos debaixo da superfície de Europa. Esta missão foi seguida pela missão *Cassini-Huygens*, que partiu da Terra em 1997, passou perto de Vénus e também outra vez perto da Terra em 1999 para adquirir impulsos gravitacionais, depois por Júpiter para outro impulso e chegou a Saturno em Julho de 2004, e a partir desta data, está a fazer uma colheita fabulosa de dados das redondezas de Saturno. Após ter demonstrado que a superfície de Titã não está coberta com um oceano, os instrumentos de Cassini mostraram a existência de lagos, dunas, rios, montanhas, vulcões e crateras de impacto que mostram que a diversidade geológica de Titã no sistema solar só é superada apenas pela da Terra. Após a descoberta dos geysers em Enceladus e da montanha equatorial de Iapetus, a missão Cassini já foi prolongada até ao ano de 2017, ano no qual vai terminar com um mergulho fatal na atmosfera de Titã.

Para além de Saturno, além das missões *Voyager* que continuam a sua incrível jornada pelo sistema solar exterior, encontra-se a missão *New Horizons* (NASA), que deixou a Terra em Setembro de 2006 para estudar o sistema Plutão-Caronte e os objetos transneptunianos. Esta será a primeira sonda interplanetária a passar perto do planeta anão Plutão que se espera acontecer em Julho de 2015 e, a seguir, a sonda vai estudar alguns objetos da Cintura de Kuiper até ao período, 2015-2020.

4.1.5 Outros sistemas estelares

Missões de exploração de sistemas planetários extra-solares começaram em 2007, com a missão *CoRoT*. Essa missão europeia, iniciada pela França, estuda os planetas extra-solares através da técnica dos trânsitos. Ela deverá permitir a deteção de terras e super-terras. Centenas de planetas extra-solares foram encontrados até agora, mas

poucos têm características semelhantes à Terra. Com o *CoRoT* e futuras missões de exploração de planetas extra-solares, já seremos capazes de começar a comparar as informações que vêm de outros sistemas planetários com as do sistema solar.

4.1.6 Os pequenos corpos

Ao contrário da ideia, ainda geralmente aceite, de que as únicas amostras extraterrestres trazidas de volta à Terra são as das missões Apollo, grãos de cometas foram recolhidos em Janeiro de 2006 pela sonda espacial "*Stardust*" da NASA. O cometa de onde foram retiradas as amostras, *Wild 2*, pertence à família de cometas da Cintura de Kuiper. Os cometas são os "frigoríficos" do Sistema Solar, e o estudo dos grãos em laboratório deverá ajudar a compreender melhor as condições físico-químicas reinantes durante a formação do Sistema Solar. Uma outra caracterização destes grãos cometários permitirá reconstruir as suas condições de formação ou as suas evoluções no disco protoplanetário, quando as poeiras ainda estavam muito dispersas ou em acreção para formar os primeiros objetos do sistema solar.

A exploração de cometas continua com a missão *Rosetta*, que foi lançada em Março de 2004 pelo *Ariane 5*. Esta missão da Agência Espacial Europeia, cujo nome é o da "pedra basáltica" que revolucionou o conhecimento do passado, quando Champollion decifrou os misteriosos hieróglifos da escrita dos Antigos Egípcios nela inscritos, já chegou em Agosto de 2014 ao cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, entrando em órbita à sua volta. Aquando da sua aproximação da Terra para sofrer um impulso gravitacional foi confundida com um asteroide. Está equipado com o módulo de aterragem, *Philae*, que vai pousar no núcleo do cometa em Novembro de 2014. E ficando lá durante vários meses vai, com os seus 21 instrumentos científicos, documentar como é que o cometa que se dirige para o interior do sistema solar, muda e reage a este encontro próximo com o Sol. Um dos objetivos particulares é estudar o papel desempenhado pelos cometas na origem da vida na Terra.

Finalmente, *Dawn*, uma missão da NASA com numerosas colaborações europeias, vai explorar dois dos maiores objetos na cintura de asteroides. Esta missão usa a propulsão iónica, que foi utilizado pela ESA para a *SMART-1* (Lua). Com este tipo de propulsão já alcançou Vesta em 2011, entrando em sua órbita e de seguida, libertando-se da sua atração, saiu em direção ao planeta anão Ceres que será atingido em 2015. Esta missão foi lançada com sucesso em Setembro 2007, depois de muitas vicissitudes durante a sua definição.

4.2. OS DESAFIOS DO SÉCULO XXI

Olhando a evolução das observações dos planetas, desenha-se uma progressão de estudos globais para estudos mais restritos que exigem tecnologias mais complexas. Pousar *rovers* na superfície de Marte ou um *lander* na superfície de Titã não é simples. Mas esses desafios tecnológicos foram cumpridos com êxito. Os objetivos científicos foram, essencialmente, descobrir e caracterizar os objetos do sistema solar para melhor conhecer o sistema dentro do qual nos encontramos. Embora existam muitos objetos ainda não caracterizados, as questões científicas concentram-se agora na origem da vida, na possibilidade de vida fora da Terra, e nas razões pelas quais a Terra é singular. Marte, Europa, Titã e Enceladus são, para já, os objetos do sistema solar mais interessantes neste contexto.

Depois da descoberta de planetas extra-solares torna-se necessário caracterizá-los. Como é inconcebível para já, enviar sondas para os estudar de perto, têm de ser inventados e construídos telescópios espaciais que os permitirão observar e obter as suas propriedades principais como, por exemplo, a composição atmosférica.

Enfim, não podemos passar em silêncio a presença do homem no espaço. Algumas palavras sobre o assunto ao concluir este capítulo.

4.2.1 Exploração de Marte

A exploração de Marte até 2008 foi marcado por falhas da *Mars Observer* (1992) e da *MARS96*. Até à missão *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), os objetivos científicos e os instrumentos eram os definidos nos anos oitenta. Alguns instrumentos suplementares foram adicionados, tais como os radares para detetar a profundidade da água no caso de ela existir. Marsis em *MarsExpress* e Sharad em MRO trabalham em diferentes comprimentos de onda e podem sondar a vários quilómetros abaixo da superfície. Após vários anos de operação, a água ainda não foi encontrada no subsolo marciano.

Esta pesquisa da água está relacionada com a conceção de que a vida não existe sem ela. "Sigam a água" foi o tema que comandou a escolha das missões da NASA. Os resultados sugerem que a água esteve presente na superfície de Marte, no passado, assim como breves episódios vulcânicos mais recentes têm colocado um pouco de água sobre a superfície deste planeta. Mas a prova da presença de grandes reservatórios subterrâneos ainda não foi encontrada.

Um dos objetivos da exploração marciana é de encontrar sinais de vida passada ou presente nas rochas marcianas. Como se reconhece que a vida, se ela existe (ou existiu), é microscópica, é então necessário estudar as amostras com técnicas laboratoriais. No fim do século XX, por volta de 1998, a agência espacial francesa

propôs uma missão para trazer amostras de Marte em cooperação com a NASA. O número de problemas técnicos e depois, a evolução do custo fizeram com que este projeto tivesse de ser abandonado poucos anos depois. A parte "exploração" da ESA continuou este projeto para, por um lado, propor uma missão exobiológica com os instrumentos a bordo de um rover marciano capaz de perfurar até dois metros no chão do planeta vermelho e, por outro lado, a recolha de amostras será feita a seguir ao mesmo tempo pelo NASA e pela ESA planejada para acontecer em 2020, com etapas intermediárias para testar as tecnologias necessárias para a realização do primeiro, "ir e vir Terra-Marte". Estes projetos permitirão preparar a eventual construção de uma base marciana num futuro mais longínquo.

4.2.2 Exploração de Europa e Titã

Ambos os satélites têm grande interesse exobiológico. Europa poderá ter a sua água em contacto com a rocha em condições muito semelhantes às que existem nas profundezas dos oceanos da Terra. A recente descoberta de vida nas profundezas dos oceanos da Terra e suficientemente longe das zonas vulcânicas mostra que os organismos se podem desenvolver lá, onde o hidrotermalismo está ativo. É necessário, portanto, fazer uma primeira missão de caracterização do oceano (profundidade, tamanho, composição) e suas camadas internas. Para isso, é necessário dispor de um satélite em órbita de Europa. Mas os desafios tecnológicos são importantes devido às radiações particularmente intensas na região de Júpiter.

Uma vez que o satélite de Júpiter foi o melhor caracterizado, faltará sem dúvida pousar á sua superfície e analisar o gelo. Será necessário encontrar o material que chega a superfície vindo do interior e poderá conter uma evidência de vida marinha existente. Tal projeto a roçar a ficção científica, provavelmente, não poderá ver a luz do dia antes da segunda metade do século XXI.

A missão Cassini revelou Titã, o maior satélite de Saturno. Este satélite composto por metade de gelo e metade silicatos, oferece uma diversidade de paisagens geológicas com lagos, rios, criovulcões, montanhas, dunas. É também o único com uma atmosfera densa composta principalmente de dinitrogénio (N_2), como a Terra, e metano cuja origem é motivo de debate. Somente a Terra parece mais diversificada do que este satélite distante. O metano em Titã poderia desempenhar um papel semelhante à água na Terra e na comparação dos dois sistemas vai fornecer informações sobre os processos pelos quais os elementos voláteis, como o ciclo da água para os planetas terrestres e metano para os satélites dos planetas gigantes. O interior de Titã também deve ter um oceano e a questão da existência de uma vida no oceano permanece em aberto.

Para melhor caracterizar Titã, é necessário enviar uma sonda e estações provavelmente no solo. Mais uma vez, há projetos da ESA e da NASA. A implementação desses projetos vai exigir quase uma década.

4.2.3 Planetas extra-solares

A descoberta de planetas em torno de outras estrelas abre um novo capítulo na ciência planetária. Já se estão a descobrir planetas do tamanho da Terra o que vai permitir definir melhor o papel da Terra. É assim tão única? As placas tectónicas existem além da Terra? Haverá atmosferas de oxigénio noutros lugares? A vida existe noutros lugares? Estas são perguntas que os futuros observatórios em órbita à volta da Terra ajudarão a tentar encontrar respostas.

Já que não podemos chegar perto destes planetas, é necessário desenvolver telescópios espaciais que possam vê-los. Em 2003 foi lançado o telescópio espacial Spitzer pela NASA. Esse equipamento permite observar diretamente as ondas de calor vindas de planetas distantes e, assim, inferir suas propriedades. Os projetos de interferometria na órbita da Terra foram lançados. Os desafios tecnológicos são significativos, mas provavelmente não são mais difíceis de resolver do que as que já existiam há 50 anos, para dar os primeiros passos na exploração do sistema solar. Tais projetos serão realizados no século XXI.

4.2.4 Outros projetos de exploração espacial

Além dos objetivos anteriormente mencionados muitos outros serão alcançados no futuro próximo. Está previsto retornar a Mercúrio (missão *Bepi-Colombo* e *Messenger*), ir explorar novos asteroides (projeto *Marco Polo*) para trazer uma amostra de Fobos (missão *Phobos-Grunt*), e até mesmo ir explorar a Cintura de Kuiper (*New Horizons*).

Enfim a Lua, provavelmente, continua a ser um dos maiores desafios do século XXI. Às vezes referido como o "oitavo continente", o nosso satélite verá chegar em breve novas pessoas à sua superfície, apesar do interesse científico bastante modesto. Mas é aí que o homem vai provavelmente aprender a trabalhar em completa autonomia e fazer o ensaio das tecnologias necessárias para as missões tripuladas a Marte e além. Por exemplo, a China quer colocar um homem na Lua já nos anos mais próximos.

E aqui convém não esquecer um “pormenor” importantíssimo.

É que a vida no sistema solar não é só a que está instalada à superfície ou no interior de cada um dos seus planetas ou luas. Também envolve aquela que ao expandir-se, vai obrigatoriamente ter de morar no espaço, não só a microbiana mas aquela que está no topo da complexidade, a vida animal.

E o que se sabe hoje sobre a vida nestas condições?

Ora, ir ao e permanecer no espaço é muito complicado. Não há ar, um vazio quase total. Assim não se pode respirar. Se berrarmos ninguém nos houve, pois o som não tem meio onde se propagar. Por isso devemos ir para lá com equipamentos especiais e garrafas de oxigénio e aparelhos de comunicação por rádio. Os materiais comportam-se de forma diferente. Os líquidos evaporam-se enquanto os lubrificantes endurecem e tornam-se inúteis. Os raios solares e os raios cósmicos altamente energéticos podem decompor materiais como o plástico e a borracha, danificar os aparelhos eletrónicos e elétricos e também o corpo humano pois não há camada de ozono para filtrar os UV, nem campo magnético para os desviar. Deste modo, para os voos espaciais usam-se necessariamente novos materiais mais resistentes. As temperaturas tanto podem ser muito baixas, próximas do zero absoluto nas zonas de sombra como muito elevadas, superiores a 100 °C, nas zonas iluminadas e passar de umas para as outras pode ser uma questão de minutos e/ou de poucos centímetros. Ora, as naves espaciais devem ser construídas de modo a darem a maior proteção possível contra todos estes perigos (Pinna, 2002, pp. 18-19).

E aqui surge talvez o problema principal e vital para a vida complexa. É a designada “ausência de peso” que faz os astronautas voarem como se fossem penas. Por exemplo, como é que se poderá transportar gado bovino pelo espaço?

Quando se está em órbita da Terra, a gravidade não desaparece. Senão a nave não girava à volta da Terra. Apenas se fica num estado de imponderabilidade. Tudo cai para a Terra com a mesma aceleração e, por isso mesmo, as distâncias entre os objetos mantêm-se umas relativamente às outras, o que dá a sensação de não pesarem. Este estado cria muitas situações caricatas: por exemplo, se uma pessoa estiver a segurar um objeto e soltá-lo, ele vai permanecer – em relação à pessoa e à nave – no mesmo lugar em que foi solto. Mas, para os organismos dos astronautas é, no mínimo, muito chato. Os organismos multicelulares muito complexos estão altamente especializados para viver bem adaptados há aceleração da gravidade. No nosso caso, quando se não sente esta, vários dos reguladores internos do nosso corpo deixam de funcionar corretamente. Já com os micróbios não há grandes problemas de sobrevivência, de acordo com o descrito atrás na panspermia. Por exemplo, o sistema de equilíbrio, baseado na visão, nos sensores tácteis espalhados por todo o corpo e num órgão, o labirinto, situado no ouvido interno, começa a enviar sinais contraditórios ao cérebro. O cérebro confunde-se, surgem as náuseas. O sistema cárdio-respiratório também sofre alterações. E por isso o rosto incha. A pressão arterial fica descontrolada. Além disso, o novo ambiente requer menor esforço

que o terrestre. Logo os músculos tendem a atrofiar-se e os ossos a descalcificar-se. Tudo isto acontece com longas permanências no espaço. E para voltar novamente ao ambiente terrestre a gravidade parece que asfixia, que esmaga. Ora apesar de tudo isto, é possível viver no espaço mas muito condicionados.

E no caso de se querer “ir às estrelas”?

Neste caso temos uma das maiores razões para sustentar a hipótese da pouca probabilidade da vida complexa se poder expandir pelo espaço. Temos os problemas das radiações cósmicas solares, galácticas e também as radiações aprisionadas por campos magnéticos criados por corpos celestes. Ora, a imponderabilidade continua a verificar-se mas a aceleração gravítica reduz-se milhares de vezes pelo que praticamente desaparece (Clancy, Brack & Horneck, 2005, cap.7). Uma das hipóteses talvez seja criar gravidade artificial. Construir uma nave gigantesca com vários quilómetros de diâmetro o que para já só existe na ficção científica. Talvez um dia seja possível criar micro-buracos negros e à sua volta construir uma nave. Ou, por exemplo, utilizar um asteroide e reduzi-lo a algo muito minúsculo. Ou colocando uma nave a rodar ou duas naves irmãs ligadas por um eixo a rodar (Clancy, Brack & Horneck, 2005, 146-147). A reação normal a atuar nas diversas partes da nave criariam a sensação de gravidade. Por exemplo, para obter uma aceleração de gravidade de 0,35 g, a nave teria de ter pelo menos 17 m de raio e uma velocidade angular máxima de 4 rpm. Além disso, a tabela periódica ainda poderá ainda crescer mais. A criação de novos elementos com propriedades inovadoras talvez permita criar materiais que aguentem acelerações incríveis. E talvez um dia se descubra uma tal força gravitacional repulsiva referida na ficção científica que permitirá a elevação de grandes massas para o espaço. Atualmente o que se pode fazer é mandar robots. E aumentar a velocidade de cruzeiro.

Um dos primeiros objetivos de várias missões foi o de estudar os efeitos sobre o corpo humano que as longas permanências no espaço criam. E o que está dito atrás é o resultado de algumas dessas missões tripuladas que, com a exceção da missão Apolo, aconteceram todas à volta do nosso planeta. É preciso uma preparação especial. É devido a estas dificuldades sentidas pelo Homem no espaço, que as naves espaciais vão ser cada vez mais equipadas com robots. E estes têm permitido avançar muito no conhecimento do Universo. A longo prazo é necessário desenvolver a vida artificial.

*S' tôr!...
Do outro lado do mundo
tão de pernas pr'o ar?!
Não caem?!*

Aluno

5. O SISTEMA SOLAR VAI À ESCOLA

Os programas escolares devem refletir a importância que a evolução da Ciência e da Tecnologia tiveram, têm e terão para o desenvolvimento do Homem como ser civilizado, com consciência cívica e ambiental. E de facto a astronomia está à frente de tudo isto. E tem reflexo em todas as disciplinas. É também por isso multidisciplinar como veremos a seguir.

Iniciemos então uma viagem crítica aos programas das várias disciplinas do 3º Ciclo e Secundário que estão ou que vão entrar em vigor nas nossas escolas, para se ter uma ideia do modo como os assuntos tratados nesta tese se inserem ou podem inserir nos currículos escolares apresentando até algumas sugestões.

No 7º ano, na disciplina de Ciências Físico-Químicas (Fiolhais et al., 2013), há três domínios e a Astronomia é contemplada com um deles, *Espaço*, dividido em quatro subdomínios: *Universo, Sistema Solar, Distâncias no Universo, A Terra, a Lua e forças gravitacionais*. No entanto, nos outros 2 domínios deste nível, *Materiais, Energia*, estão indicados conceitos que podem ser tratados com a ajuda da Astronomia, por exemplo: densidade (densidades dos planetas e de outros corpos celestes); mudanças de estado físico (sublimação da água em Marte). Saúdam-se as referências aos telescópios e, sobretudo, às missões espaciais. Aliás, uma futura existência de um subdomínio só para tratar das viagens espaciais não me parece descabido. Ora, além das máquinas espaciais serem as mais complexas alguma vez criadas pelo homem, com tecnologia de ponta, também rebocam o resto do conhecimento científico-tecnológico da Humanidade para novas conquistas (com robots por exemplo), mais parecendo uma espécie de “Júpiter a catapultar um astro para o espaço exterior”. De facto, as viagens espaciais vão ser muito frequentes no futuro da Humanidade e é necessário prestar homenagem aos novos “navegantes espaciais”, numa época onde se tenta premiar os melhores e isso faz-se única e verdadeiramente, através da perpetuação da sua memória. E os antigos construtores das ciências astronómicas também merecem ser lembrados como Galileu, Huyghens, Cassini, Hubble, etc.

E relacionado com o atrás referido, está descrito nos programas de Geologia, 10º ano e 12º ano, que se deve atribuir um especial destaque à História da Ciência, em

particular no suporte de estratégias de ensino baseadas em exemplos históricos. Assim nesses programas pode ler-se que,

... o conhecimento de antigas formas de pensar, obstaculizadoras, em determinados momentos, do desenvolvimento científico, associado à compreensão e valorização de episódios históricos que traduzem uma mudança conceitual, ajuda a identificar não só os conceitos estruturantes como pode, igualmente, ser uma ferramenta importante na sua superação.

Amador et al., Programa de Biologia e Geologia, 10º ano, p.12

Além disso, a meta 5.18 do subdomínio, *Propriedades físicas e químicas das substâncias*, indica, *identificar o comportamento excecional da água* (massas volúmicas do gelo e da água líquida e presença na natureza dos três estados físicos), relacionando esse comportamento com a importância da água para a vida. Quanto ao domínio, *Energia*, as metas a atingir estão relacionadas com as fontes, formas e transferências de energia e dentro destas a energia dos alimentos. Ora, as formas de energia como o calor estão presentes nos astros, o Sol tem muita energia que é atirada para o espaço na forma de luz mas antes de chegar à sua superfície é transportada no seu interior por correntes de convecção, os alimentos têm energia química que é energia do Sol armazenada e a taxa de transferência do calor do interior dos planetas para fora depende do seu tamanho o que serve para exemplificar as matérias lecionadas. Quanto ao oitavo ano, fala-se nos triângulos da visão e da audição. Ora, as condições para haver vida num planeta ou lua também formam um triângulo.

Penso que não seria despropositado propor a construção de um telescópio como matéria do 8º ano em Ciências Físico-Químicas, quando se lecionam as lentes, no subdomínio, *Fenómenos Óticos*, do mesmo modo que os alunos conhecem a constituição de um microscópio no 5º ano na disciplina de Ciências da Natureza, no subdomínio, *Célula - unidade básica de vida*, com o objetivo geral 14, *Aplicar a microscopia na descoberta do “mundo” invisível* com seis descritores relacionados diretamente com o microscópio (Bonito et al., 2013, p.8). Ou então todas as escolas terem um telescópio do mesmo modo que têm muitos microscópios.

Continuando nas Ciências Naturais, no 7º ano só há um domínio, *Terra em transformação*, com 5 subdomínios, dos quais se destacam, por ordem, os quatro primeiros (Bonito et al., 2013, p. 14-17): *Dinâmica externa da Terra, Estrutura e dinâmica interna da Terra, Consequências da dinâmica interna da Terra, A Terra conta a sua história*. No segundo subdomínio temos o objetivo geral 4, com 9 descritores referentes à tectónica de placas e o objetivo geral 5, descritor 5.5, aonde se relaciona

a deformação das rochas com a formação de cadeias montanhosas; no terceiro subdomínio, temos os objetivos gerais do 6 ao 12, relacionados com o vulcanismo, a atividade sísmica e, em especial, no objetivo 12 temos o descritor 12.4, *Caracterizar, a partir de esquemas, a estrutura interna da Terra, com base nas propriedades físicas e químicas (modelo geoquímico e modelo geofísico)*. No quarto subdomínio, salienta-se o objetivo geral 14, *Compreender as grandes etapas da história da Terra*.

No 8º ano, no domínio, *Terra - um planeta com vida*, também temos o subdomínio, *Sistema Terra: da célula à biodiversidade* (Bonito et al., 2013, p. 19), mas salta à vista o objetivo geral 1, *Compreender as condições próprias da Terra que a tornam o único planeta com vida conhecido no Sistema Solar*, com os 5 descritores relacionados com a posição da Terra no Sistema Solar, gráficos da evolução de vários parâmetros (temperatura, energia solar, CO₂) ao longo do tempo geológico, influência da atividade dos seres vivos na evolução da atmosfera terrestre e o efeito de estufa. Mas os objetivos gerais 2 e 3 também são importantes pois nos seus descritores estão contemplados as células procariontes e eucariontes, organismos unicelulares e multicelulares e outras características. No subdomínio, *Ecossistemas*, estão contemplados a evolução e a extinção das espécies relacionadas com as alterações do meio ambiente.

No 9º ano, com o domínio, *Viver melhor na Terra*, temos o descritor 3.3, *Identificar os elementos químicos mais abundantes no corpo humano*, e o descritor 4.5, em que se relaciona a insuficiência de alguns elementos com os seus efeitos no organismo.

Também na disciplina de Geografia se notam ligações à astronomia e à vida nas metas curriculares a atingir para o 7º ano, (Almeida et al., 2014, p. 4-6), que se inserem em dois domínios. Assim no domínio, *A Terra: estudos e representações*, temos o subdomínio, *A Localização dos diferentes elementos da superfície terrestre*, em que o objetivo geral 1, *Compreender a importância dos processos de orientação na localização relativa* contém os descritores 2, 3 e 4, relacionados com a orientação pela estrela polar, pelo Sol, utilizando o movimento diurno aparente do Sol e pela bússola tendo em atenção o conceito de declinação magnética (este conceito não faz parte das metas do 3º ciclo de Física e Química). No domínio, *O Meio natural*, subdomínio, *O clima*, temos o objetivo geral 2, *Compreender a variação diurna da temperatura*, com os descritores 3 e 4 onde se relaciona a variação diurna da temperatura com o movimento de rotação da Terra e o ângulo de incidência dos raios solares com a espessura da atmosfera a atravessar e com a superfície de incidência, e o objetivo geral 3, *Compreender a variação anual da temperatura*, com o descritor 3, onde se

relaciona a *variação anual da temperatura com o movimento de translação da Terra, realçando solstícios e equinócios*. Também se tratam dos assuntos: a influência dos oceanos na regularização do clima da Terra; os processos e agentes erosivos.

Quanto ao 9º ano, (Almeida et al., 2014, p. 24-25), temos no domínio, *Riscos, Ambiente e Sociedade*, um subdomínio, *Riscos Mistos*, com três objetivos gerais particularmente interessantes: objetivo 1, *Compreender a influência da atmosfera no equilíbrio térmico da Terra* com 5 descritores onde se trata da estrutura da atmosfera e da radiação que por ela passa relacionando-a com o equilíbrio térmico da Terra; objetivo 2, *Compreender a influência da poluição atmosférica na formação do smog e das chuvas ácidas*, e o objetivo 3, *Conhecer a influência da poluição atmosférica no efeito de estufa e na camada de ozono*, com 7 descritores onde se abordam já as chuvas ácidas e o efeito de estufa. E também no descritor 1 do objetivo geral 4, se refere a importância da hidrosfera para a vida.

No Ensino Secundário, no 10º ano (Amador et al., 2001), a componente de Geologia do programa, contempla 3 temas e todos importantes: tema I - *A Geologia, os geólogos e os seus métodos*, aborda os princípios básicos do raciocínio geológico, a tectónicas de placas, a medição do tempo e a idade da Terra: tema II - *A Terra, um planeta muito especial*, aborda a formação do sistema solar, da lua e da diferenciação da Terra e da geologia dos restantes planetas telúricos; tema III - *Compreender a estrutura e a dinâmica da Geosfera*, que trata da vulcanologia e da sismologia e finda com a estrutura interna da geosfera. No 11º ano, há um tema, o IV, mas que é relativamente menos importante. A componente de Biologia (Amador et al., 2001, 80-81, 84-85), tem como tema central, *A Vida e os Seres Vivos*, e contempla 4 unidades, tratando a primeira dos mecanismos que garantem a obtenção de matéria pelos seres vivos heterotróficos e autotróficos, com diferente grau de complexidade tratando-se da fotossíntese e da quimiossíntese enquanto a terceira tenta responder á questão, *Para que serve a matéria que chega às células?* centrando-se nos processos de transformação de energia, nomeadamente na utilização das vias aeróbia e anaeróbia pelos seres vivos. Quanto ao programa do 11º ano (Amador et al., 2003, 5-7, 11-12), também há 4 unidades, abordando-se na Unidade 5, entre outros, o conteúdo do DNA e a síntese proteica e na Unidade 7, abordam-se os conteúdos da unicelularidade e da multicelularidade e os mecanismos da evolução. No 12º ano, na Geologia (Amador et al., 2004, 21-39), há três temas, estando os dois primeiros muito relacionados com os conceitos estudados: Tema I, *Da Teoria da Deriva dos Continentes à Teoria da Tectónica de Placas. A dinâmica da litosfera*, que aborda um período relativamente recente da história da geologia, analisando a dinâmica das placas litosféricas com a

formação de cadeias de montanhas numa perspetiva de constante progresso da investigação científica que pode trazer novas surpresas nos próximos anos (este último aspeto pode até ser também abordado na disciplina da Filosofia); Tema II, *A História da Terra e da Vida*, que reconstrói o passado do globo terrestre com base em métodos de datação inseridos na paleogeografia, paleoclimatologia e paleontologia. Ora, este trabalho exige rigor mas também imaginação.

Nas metas dos programas da disciplina de História, só temos alguns assuntos, relacionados com as ciências e tecnologias e em perspetivas muito gerais. Nas metas do 3º ciclo (Ribeiro et al., 2013, p.6), e para o 7º ano temos um só descritor, o 4, *Referir a autonomia e o grau de sofisticação alcançado no mundo grego pela filosofia e pelas ciências*, para atingir o objetivo geral 3, *Conhecer o elevado grau de desenvolvimento atingido no mundo grego pela cultura e pela arte*. No 8º ano, já temos mais descritores. Assim, para atingir o objetivo geral 1, (Ribeiro et al. 2013, p.14), *Conhecer e compreender o pioneirismo português no processo de expansão europeu*, que faz parte do domínio *Expansão e mudança nos séculos XV e XVI*, temos o descritor 3 que se refere à explicação das várias condições, entre as quais as técnicas e científicas que possibilitaram o arranque da expansão portuguesa, inserida no expansionismo europeu. Para conhecer e compreender o Renascimento, temos no domínio, *Renascimento, Reforma e Contrarreforma*, o descritor 4, (Ribeiro et al. 2013, p.15), *Relacionar os valores cultivados pelo movimento renascentista com o alargamento da compreensão da Natureza e do próprio Homem, salientando exemplos do grande desenvolvimento da ciência e da técnica operado neste período (séculos XV a XVI)*. No subdomínio, *O Antigo Regime europeu: regra e exceção*, para atingir o objetivo geral 3, temos os descritores 2 e 3, *Reconhecer a importância do método experimental e da dúvida metódica cartesiana para o progresso científico ocorrido e Reconhecer a consolidação, nestes séculos, do desenvolvimento da ciência e da técnica, referindo os principais avanços científicos e os seus autores* (Ribeiro et al. 2013, p.16). No subdomínio, *Um século de mudanças (século XVIII)*, (Ribeiro et al. 2013, p.17), temos no objetivo geral 1, *Conhecer e compreender os vetores fundamentais do Iluminismo*, o descritor 1, *Relacionar as ideias iluministas com a crença na razão potenciada pelo pensamento científico do século XVII*. No subdomínio, *Da “Revolução Agrícola” à “Revolução Industrial”*, (Ribeiro et al. 2013, p.19), temos o objetivo geral 2, *Conhecer e compreender as características das etapas do processo de industrialização europeu de meados do século XVIII e inícios do século XIX*, com o descritor 3, *Referir a importância da incorporação de avanços científicos e técnicos nas indústrias de arranque (têxtil e metalurgia)*. No domínio, *A*

civilização industrial no século XIX, com o objetivo geral 3 (Ribeiro et al. 2013, p.20), *Conhecer e compreender os principais aspetos da cultura do século XIX*, objetivo geral 1, *Relacionar a industrialização com o reforço do prestígio e da capacidade de intervenção da ciência e da tecnologia e do seu impacto no quotidiano das populações*. No 9º ano apenas uma referência à importância das novas tecnologias de informação, comunicação e transportes e sua influência na globalização económica e cultura (Ribeiro et al. 2013, p.31). Uma mera “nota de rodapé” num mundo onde o desenvolvimento científico e tecnológico é só, o maior de todos.

Quanto à História do 10º ano são feitas referências à ciência só no módulo 3, (Mendes et al., 2001, p. 30) *Abertura Europeia ao Mundo - Mutações nos conhecimentos, sensibilidades e valores nos séculos XV e XVI*, onde temos no conteúdo 2, *O alargamento do conhecimento do mundo*, através da observação e descrição da natureza, da matematização do real e da revolução das concepções cosmológicas, e que envolvem conceitos como a *navegação astronómica*, cartografia, experiencialismo, mentalidade quantitativa e *revolução Copernicana*. No 11º ano, temos no módulo 4 (Mendes et al., 2001, p. 36), conteúdo 4, *Construção da modernidade europeia*, o ponto 4.1, *O método experimental e o progresso do conhecimento do homem e da natureza* (Iluminismo) e no módulo 6, (Mendes et al., 2001, p. 43) e no conteúdo 1, o ponto 1.1., *A expansão da revolução industrial com Novos inventos e novas fontes de energia: a ligação ciência-técnica*. Este último caso também surge em História-B 10º ano (Mendes, 2001, p. 27). No 12º ano, temos uma referência à ciência inserida no módulo 9, conteúdo 2.2, (Mendes et al., 2001, p. 60), *Dimensões da ciência e da cultura no contexto da globalização*, com o ponto 2.2., *Primado da ciência e da inovação tecnológica; revolução da informação; ciência e desafios éticos*, referente aos tempos mais atuais. Que também surge em História-B, 11º ano (Mendes, 2001, p. 15).

Ora, a História deveria a meu ver, refletir mais a importância da ciência e da tecnologia na evolução das sociedades. A Astronomia era importante para os povos antigos por causa das colheitas agrícolas, na construção de calendários, na adoração aos deuses (os planetas e o Sol eram considerados deuses) nas celebrações religiosas e profanas e de muitas outras maneiras. Os monumentos eram alinhados segundo determinadas estrelas ou fenómenos astronómicos. A arqueoastronomia infelizmente é ainda ignorada pela maior parte dos arqueólogos e historiadores. E, na Antiguidade, temos um grande e luminoso período (entre os séculos VI a.C. e V d.C.) no Mediterrâneo Oriental graças essencialmente ao génio grego. Já havia quem acreditasse em átomos, em inúmeros astros habitados por seres vivos como nós, no sistema

heliocêntrico, quem medisse o diâmetro da Terra, e tamanhos relativos do Sol Lua e Terra, já havia máquinas tais como a máquina de Antíkira que nada mais era que um computador astronómico e havia Hierão de Alexandria que fez experiências com máquinas a vapor e tantos e tantos outros cientistas e pensadores que hoje estão quase ou totalmente esquecidos. De facto, em Alexandria onde estava uma das maravilhas tecnológicas do mundo antigo, o farol, existia também uma grandiosa Biblioteca. Nesta fazia-se já investigação de um modo sistemático (Sagan, 2009, p. 430) gerando novos e espantosos conhecimentos. E diz-se bem, existia, porque já não existe. No século IV foi destruída e anos mais tarde nos seus interiores pastaram rebanhos de cabras. Foi como se uma civilização inteira tivesse efetuado uma autolobotomia, extinguindo para sempre grande parte dos seus laços com o passado, das suas descobertas, das suas ideias e das suas paixões (Sagan, 2009, p. 434). A perda foi incalculável. Só mais de mil anos depois, no século XV é que a aventura científica e tecnológica do Homem foi em parte recuperada e continuada pelas descobertas feitas pelos nossos navegantes e que agora é feita por astronautas. Aonde estaríamos agora se esse ato criminoso e estúpido não acontecesse? Provavelmente já teríamos colonizado todo o sistema solar e estaríamos a caminho das próximas estrelas. Ora, estes mil anos que se perderam deveriam ser bem lembrados para não mais se repetirem. Como o holocausto. E também para perpetuar a memória da nata pensadora daquele tempo. Que melhor homenagem se pode fazer, senão “aspirar um pouco à imortalidade”?

Outro período que merece um tratamento especial é o século XIX. Pessoalmente acho que foi um período mais explosivo que o atual, em termos científicos e tecnológicos, pois apareceram (ou se desenvolveram extraordinariamente), o comboio, as barragens, os cabos submarinos, o avião, o carro, a bicicleta, a fotografia, o cinema, o telefone, a telegrafia sem fios (TSF), o dinamite, os barcos passaram a ser de metal e a assumir proporções gigantescas e também surgiu a astronáutica. Apareceu também a teoria da evolução. Mas há mais exemplos de outras épocas.

O que é a vida? eis uma questão de natureza filosófica.

A Filosofia nos, 10º e 11º, anos (está de facto, estruturada em 5 unidades sendo a unidade IV, *O conhecimento e a racionalidade científica e tecnológica*, a que parece mais relacionada com os assuntos tratados. O ato de conhecer tem uma estrutura que importa reconhecer, o conhecimento científico é distinto do conhecimento vulgar pois se revela mais metódico, sistemático e crítico e menos espontâneo do que este. De facto a Ciência utiliza um método que conduz à formulação de hipóteses e sua validade requer ser provada ou reprovada. Mas a ciência nada mais é que uma teoria

da realidade ou um dos modos dos humanos interpretarem a realidade. Ora, há excelentes hipóteses em todas as páginas anteriores de se analisarem questões que tocam muito de perto os limites do real/imaginário ou possível/impossível. Por exemplo, como é que pode ser possível ter havido um dia, ou melhor um instante, em que tudo o que existe esteve dentro de um ponto infinitesimalmente pequeno? É simplesmente assombroso. Eis alguns dos inúmeros temas que se podem tratar numa perspetiva multidisciplinar expressamente referida e preferida pelo programa, para além das duas perguntas/temas já postas neste parágrafo: a revolução copernicana; a estrutura das revoluções científicas; as teorias da formação do sistema solar; o Big Bang; a evolução dos modelos do Universo, etc..

Nas metas da disciplina de Português, não há nada de específico referente às matérias desta tese. No entanto, podem-se analisar textos de ficção científica. E propor trabalhos interessantes. Por exemplo, propor um trabalho intitulado, *Visita de um extraterrestre à Escola*. Como introdução, podia-se primeiro observar uma sequência de imagens sobre a vida no Universo (ou falar sobre o tema num curto intervalo de tempo) e a seguir referir algo do género: imaginemos que um extraterrestre estava numa viagem de regresso a casa para um planeta à volta de Sirius, por exemplo, desconhecido mas teve uma avaria na sua nave e foi obrigado a aterrar mesmo no pátio da escola. Como entrariam os alunos em contacto com os extraterrestres? E o que é que o extraterrestre diria? Como é que indicaria o local onde vivia? Que língua gestual? De outro tipo desconhecido? Os alunos costumam ter ideias extremamente engraçadas e originais. Não subestimemos a sua imaginação. De facto isto já foi feito por uma professora da área das línguas o que demonstra que o interesse pela Astronomia e afins se estende a todos os grupos.

Além disso, podem-se analisar textos sobre a vida dos cientistas e das épocas históricas onde viveram, ou então sobre as descobertas ou tecnologias dessas épocas. Ou propor trabalhos muito interessantes para fazer na aula ou fora dela.

Quanto à Matemática, não há temas específicos em comum. No entanto, a Astronomia é um dos campos onde a matemática pode ser aplicada e dessa interação resultam benefícios mútuos para a compreensão dos conceitos de ambas. De facto, podem-se aplicar as potências e as proporções no astronómico armazém de dados de massas, volumes, distâncias, densidades, temperaturas e pressões medidos ou calculados nos corpos celestes. As relações quantitativas existentes entre as diversas grandezas físicas podem ser tratadas em equações. Podem-se construir gráficos de todos os tipos, calcular declives, etc. Também há probabilidades na astronomia, ou afins, por

exemplo, na equação de Drake, na equação da “panspermia do sistema solar” (apresentada atrás), na probabilidade de surgir uma supernova, ou magnetar, de um meteorito de qualquer tamanho cair na Terra, nas simulações construídas para a migração planetária, etc. E os modelos de Universo, o Geocêntrico ou o Heliocêntrico são também modelos matemáticos, bem como o modelo de Big Bang.

Voltando à Física nos, 10º, 11º e 12º anos, temos as forças e entre estas uma força especial, a *força gravitacional*, que é a força que molda o Universo em alta escala. Também se tratam os tipos de movimentos e sua relação com as forças de que não faltam exemplos no espaço para explorar. O centro de massa, matéria constante das metas do 12º Física, é importante na descoberta dos exoplanetas e nos sistemas estelares duplos.

Quanto à Química em geral, basta recordar que a noção de elemento é essencial tanto para a vida como para as estrelas e planetas. Os isótopos dão energia para aquecer o interior dos planetas mas também podem servir de alimento para alguns micróbios extremófilos. Além disso podem ser excelentes marcadores de tempo ou datadores de eventos e até biomarcadores. A vida é, nada mais, nada menos, que um conjunto de compostos químicos altamente ordenados, todos eles com fórmulas químicas mais ou menos complexas e que reagem uns com os outros segundo mecanismos ainda mais complexos havendo libertação de energia. Logo a conservação e as trocas de energias estão envolvidas nestes processos tão complexos de contrariar a evolução natural dos sistemas físico-químicos para o caos, existentes no Universo. O que faz apelo às, 1ª lei e a 2ª lei da Termodinâmica lecionadas na componente da Física do 11º ano.

E a Vida depende da energia transportada por eletrões durante reações redox criadas pela vida. E a vida extremófila exige que se saiba o que são ácidos e bases, reações de ácido-base e soluções aquosas de sais e as noções associadas de concentração. Compostos orgânicos como os hidrocarbonetos também existem em Titã, iões existem nas altas camadas atmosféricas de Titã, e de outras luas e planetas. O espaço interestelar está cheio de moléculas (e a química pré-biótica também) que podem servir de material de análise. E essas moléculas e átomos podem ser descobertos à distância por análise dos seus espectros e estes são estudados no 10º Química. O hélio foi descoberto primeiro no Sol do que na Terra devido ao seu espectro. E são estes que também vão permitir descobrir a Vida além do sistema solar.

O tratamento das imagens em lentes não referem expressamente o funcionamento em termos de Ótica de um telescópio nem dum microscópio. O efeito de estufa ficaria

melhor compreendido se se utilizasse o balanço quantitativo das energias libertadas e recebidas não só para a Terra mas também para Vénus ou mesmo para Marte e Mercúrio. Para isso poderia até fazer-se uma pesquisa dentro ou fora de aula. Mas nas modernas metas este balanço energético já não se faz. No fundo, com as modernas metas que estão a ser implementadas a astronomia levou uma enorme machadada no programa de Física e Química, pois não se fala mais da nucleossíntese primordial, nos tipos de estrelas, nas reações nucleares, na matéria e antimatéria, nas leis de Stefan e de Wien. No entanto a Astronomia pode continuar presente, de uma forma indireta, em praticamente **toda** a matéria da Física e Química como atrás está descrito. Basta um pouco de imaginação e rigor. E, no entanto, paralelamente ao que Galileu disse um dia, a Terra continua a mover-se no espaço. E fala-se tanto no seu efeito de estufa! E o futuro é o espaço. E o chamamento mais poderoso para conhecer o Universo e o saber, como demonstrado pelo brilho no olhar dos nossos alunos, continua lá em cima, nas estrelinhas que sabemos hoje não ser eternas, mas das quais dependemos totalmente. O Big Bang tem um só descritor, o 1.11, no final do subdomínio, *O Universo*, no 7º ano e dois descritores, 3.17 e 3.18, no final da componente de Física do 11º ano, ou seja, uma espécie de pequena “nota de rodapé”. O não lecionar a *formação dos elementos nas estrelas* nas ciências físico-químicas equivale a lecionar história pelo “teto”, ou seja, começar a mostrar as primeiras civilizações da Humanidade sem falar na pré-história. Falta sempre qualquer coisa. E a ir contra a maré de livros de divulgação científica que continuam a ser escritos e exigem um tratamento destas matérias nas escolas.

A visão de um filme de ficção científica pode ser utilizado para iniciar uma determinada matéria em várias disciplinas. Aliás também é uma das formas de veicular conceitos científicos ou aperfeiçoar os já conhecidos. De facto, muitas pessoas só tomam conhecimento de conceitos científicos durante a visualização de filmes. Entre esses conceitos temos os buracos negros, as supernovas, a “ausência de peso”, e muitos outros.

Não se compreende a extinção da *Área de Projeto*. Assim deixou de existir a disciplina que por excelência pratica a interdisciplinaridade através da execução de trabalhos práticos ou de pesquisa. Seria nesta disciplina que poderia ser feita a medição do diâmetro da Terra apresentada neste capítulo e que envolve conhecimentos de várias disciplinas ou até mesmo a criação de um clube de Astronomia. Nota-se também alguma descoordenação entre os vários programas.

Vejamos agora algumas atividades ou demonstrações simples e muito interessantes que podem ser realizadas numa sala de aula, ou num clube.

■ A turbulência da atmosfera faz as estrelas cintilarem

Colocar um objeto no fundo de uma tina com água. Observar a água em repouso. Tocar com um objeto num dos lados da tina. Ou agitar. Observar novamente. Concluir. Comparar com o tremelicar da luz das estrelas na atmosfera.

■ As formas dos astros

Mostrar uma série de imagens de asteroides com as mais diversas formas e astros maiores com a forma esférica ou quase esférica de modo a criar questões nos alunos. Discutir as formas e relacioná-las com as intensidades das forças da gravidade.

■ A densidade e a estrutura interna dos astros

Colocar numa proveta ou gobelé, pequenos bocados de areia ou limalha de ferro, azeite e água. Agitar. Pousar. Observar o que acontece com as bolhinhas de ar à medida que o tempo passa. E também com os outros componentes. Comparar com o que se passa no interior dos planetas.

■ A estrutura interna dos astros.

Comparar um pêssigo com um planeta. A pele representa a crosta. O caroço representa o núcleo. Se for possível podem-se fazer cálculos matemáticos de dimensões relativas. Um pálmer, uma régua e uma lupa ajudam muito. Com a régua mede-se o diâmetro do pêssigo e com a ajuda da lupa e fazendo um corte mede-se a espessura da pele depois de seca. Determina-se o quociente. Com dados credíveis obtidos na net ou num manual obtém-se as espessuras da crosta e o diâmetro da Terra. Acha-se o quociente. Compara-se. Conclui-se.

Uma cebola é excelente para explicar como são as estrelas quando estão prestes a explodir em supernovas. Mas deve-se realçar as diferenças.

■ As marés.

Fazer girar um balão amarrado a uma corda à volta da mão. Observar o alongamento do balão na direção da corda. Comparar com a forma da Terra do Sol e de outros astros. Explicar as marés.

■ Densidades

Os buracos negros, anãs brancas e estrela de neutrões são dos mais atrativos para trabalhar o conceito de densidade. E para tratar em termos matemáticos com análise de tabelas de dados e construção de gráficos.

■ A Lua dá uma volta à Terra enquanto dá uma volta sobre si mesma.

Se se vê a partir da Terra sempre a mesma face da Lua, parece que esta não roda. É um bocado difícil para os alunos compreender.

Para isso basta colocar os alunos a fazer uma espécie de bailado. Eles aderem logo. Uma aluna A está parada no meio e a aluna B dá várias voltas mas com a cara sempre virada para a aluna A. Os alunos contam o número de vezes que vêm uma determinada característica da cara da aluna B e o número de voltas que a mesma aluna dá à volta da aluna A. E concluem.

■ Velocidade de arrefecimento de uma determinada massa depende dessa “massa”

Aquecer 2 gobelés de capacidades diferentes com diferentes volumes de água até ficarem com a mesma temperatura. Deixar arrefecer medindo as temperaturas em intervalos de tempo iguais. Concluir. Pode-se também construir um gráfico, *temperatura = f (tempo)*.

Relembrar o facto dum prato de sopa arrefecer mais depressa do que a sopa que está dentro de um tacho cheio. Apoiar as conclusões com os exemplos nos planetas e na indústria.

■ A estrela polar já foi outra.

Com um programa como o *Stellarium* de que se pode fazer o *download* na *net* pode-se simular que no *tempo das grandes pirâmides, século XXVI a.C.*, a estrela polar da altura era outra. Basta, sucessivamente, clicar em, *janela da data/hora*, colocar uma data do ano, por exemplo, -2700, clicar em *linhas de constelação*, clicar na *velocidade do tempo* várias vezes até observar as estrelas rodarem à volta de uma estrela, **Thuban**, que faz parte da constelação do Dragão.

Ora a importância da atual estrela polar para a orientação pode ser realçada também iniciando este assunto no 7º ano, com o *Stellarium* a apresentar a importância que a estrela Thuban tinha para os Egípcios. E pode ser aproveitada pela disciplina de História para ilustrar os conhecimentos astronómicos dos Egípcios.

Agora passemos para a análise de algumas afirmações ditas por alunos, colegas e funcionários das escolas por onde tive a sorte de passar e que podem ser aproveitadas para criar estratégias de aprendizagem.

- “Os planetas flutuam no espaço à volta do Sol, e não caem?! Como é possível?”

Questões como esta são repetidas várias vezes pelos nossos alunos – resultam dos conceitos alternativos que possuem e que, na realidade, muitos de nós já possuímos quando eramos mais novos. Mas no passado da Humanidade também há exemplos deste conceito alternativo, comuns a muitas sociedades e discerníveis em muitas frases, como por exemplo, “águas do abismo”.

Uma ideia para corrigir este conceito foi achada por mero acaso quando, numa aula, surpreendi uma aluna a distrair-se com um objeto – uma esfera metálica com um íman no seu interior e um pequeno boneco metálico. O boneco mantinha-se de pé sempre na direção do centro da esfera mesmo que esta fosse virada ao contrário.

De facto grandes descobertas se fazem por mero acaso e neste caso descobri uma estratégia. A simples colocação de um prego ou moeda de 2 cêntimos perto da dita esfera em várias posições permite dar uma ideia do que se passa. Mas convém esclarecer que a força que atua neste caso é a magnética e não a gravítica.

No entanto há outras estratégias. Numa bola de futebol ou basquete relativamente grande podem-se colocar (ou colar) vários bonecos, ou representações em miniaturas. Uma imagem vale mais que mil palavras. Pode-se também simular que estamos a ver do espaço, um objeto situado à superfície da Terra em várias latitudes. Por exemplo, representar o Globo terrestre com um mesmo monumento em vários locais mas em dimensões muito pequenas. Observar em vários locais. Fazer zoom 500%. Concluir. O ideal seria mesmo pôr um boneco a saltar em vários locais dessa representação. O simples mostrar de imagens de astronautas dentro das estações orbitais em volta da Terra e que se encontram acessíveis no youtube pode ser suficiente. Estas impressionam, atraindo logo a atenção do aluno e dificilmente se vão apagar das suas memórias.

- Professor, já viu o número de Algarismos num ano-luz?! São tantos!...

- Jorge fala-lhes dos quilómetros existentes num ano-luz!

Estas duas afirmações, ditas por gente crescida e fascinada com a astronomia, são reveladoras da impressão causada nas pessoas pelas reais dimensões das coisas astronómicas. O cálculo pode ser feito com pormenor para relacionar horas com segundos (muitas vezes os alunos referem que 1 h tem 60 s!...) com escrita por extenso do número e sua transformação numa potência expressa na notação científica.

Uma aluna repara numa representação - pequenas bolinhas espetadas por pauzinhos em cima de um vaso representam os planetas e algumas luas do sistema solar todos alinhados - e exclama:

- *Stôr aquilo não tá bem!... Júpiter tem de ser maior!... e a Lua tá muito grande!...*

Numa outra aula, desenhavam-se círculos a representar luas.

- *Isto é a Lua!...mas isto aqui é Ganimedes! ...* e desenha-se um círculo maior, mais ou menos, na proporção certa.

- *E se fosse a Terra?!... Propõe o professor!*

Então com as duas mãos mantidas à distância uma da outra igual ao diâmetro representado da Lua, conta-se quatro vezes acabando por sair dos limites do quadro!

E logo uma aluna intervém:

- *Stôr!...então se fosse Júpiter! nem cabia na sala!*

Aproveita-se então para esclarecer,

- *Neste caso, o diâmetro seria, mais ou menos, 40 vezes maior, e o círculo teria que chegar - aproximando-se da janela - talvez a meio da distância entre este bloco e o outro que veem em frente.*

Neste caso até se poderia propor o tamanho que o Sol teria nas mesmas proporções. E conforme a reação dos alunos poderia propor alguns cálculos.

De facto os alunos reparam e bem nas proporções. E é uma ótima forma dos alunos estabelecerem relações de grandeza. E começarem a fazer cálculos simples até sem recurso a máquinas.

Aula de 10º ano dos cursos profissionais. Apresentaram-se os números de estrelas da nossa galáxia e número de pessoas que há no mundo. Comparam-se.

Inesperadamente um aluna intervém,

- *Se há tantas estrelas como é que vão dar tantos nomes?*

- Talvez um nome seguido de um número ou uma série de letras seguidas por um número. É impossível dar nomes individuais a bilhões de estrelas sem recorrer às máquinas e aos números... se calhar algo deste género,... esta é a estrela Maria 1, depois Maria 2, Maria 3 e por aí adiante...

Ora isto provocou o sorriso nalguns alunos que detestam que os chamem pelos números.

- Se procurarem na net os nomes de algumas estrelas encontram frequentemente um nome seguido de um número.

Erros toda a gente os dá. De facto, os erros são algo de muito natural. E na natureza, nas nossas células até dirigem a seleção natural. Ora, no meio de centenas de milhares de palavras é muito difícil não cometer alguns.

O que se deve, nestes casos, é diminuí-los ao máximo possível, o que se consegue sendo-se mais rigoroso, mais sucinto, mais claro e estando com o cérebro menos tenso, mais arejado e mais concentrado no que estamos a dizer e a fazer. E utilizando fontes mais credíveis. E dizendo ou escrevendo menor número de palavras ou algarismos. De facto, os alunos adoram descobrir erros e contradições cometidos pelos seus educadores. No entanto, estes podem também ser utilizados para gerar aprendizagem, para atingir fins educativos. Têm um poderoso valor formativo para o Homem. Crescemos com o que fazemos bem mas também com o que fazemos mal.

Eis um pequeno exemplo retirado de uma frase de um manual:

“...O Sol tem cerca de **98%** da massa do Sistema Solar...”

Mas noutra fonte de informação está indicado, **99,7 %**. Apesar de parecer pouco a diferença de um por cento traz consequências.

Ora, cerca de 0,3 % são suficientes para construir os oito planetas do sistema solar mas 2% é cerca de 2/0,3 vezes maior que 0,3 %. Ou seja, 6,7 vezes. Ou seja, há mais de seis vezes massa suficiente para construir planetas.

Podemos então concluir que, a ser verdade que os planetas constituíssem cerca de 2% em vez de 0,3 % então poderiam existir em média, mais de seis vezes mais planetas que aqueles que existem. Ou seja, mais de 50 planetas.

E agora, uma tarefa realmente ... do tamanho do mundo, mas que a imaginação pode reduzir a dimensões humanas

Medir o diâmetro da Terra

Pode-se determinar um majorante do diâmetro da Terra.

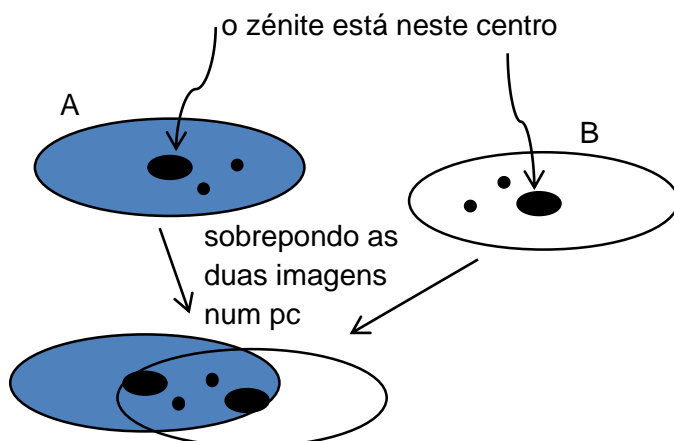
Para isso basta tirar 2 fotos, à noite, do zênite em dois locais diferentes **exatamente à mesma hora**. Com um fio-de-prumo pode-se fixar a vertical e tirar a foto de modo a que o prumo fique no meio

Uma sequência de operações possível pode ser a seguinte:

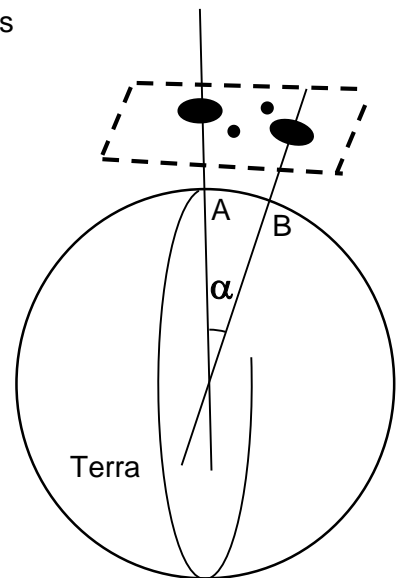
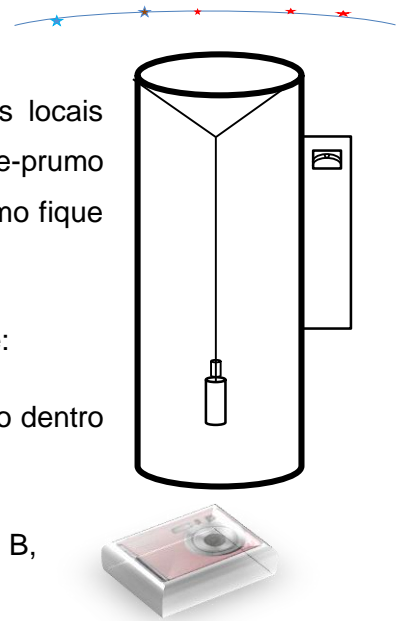
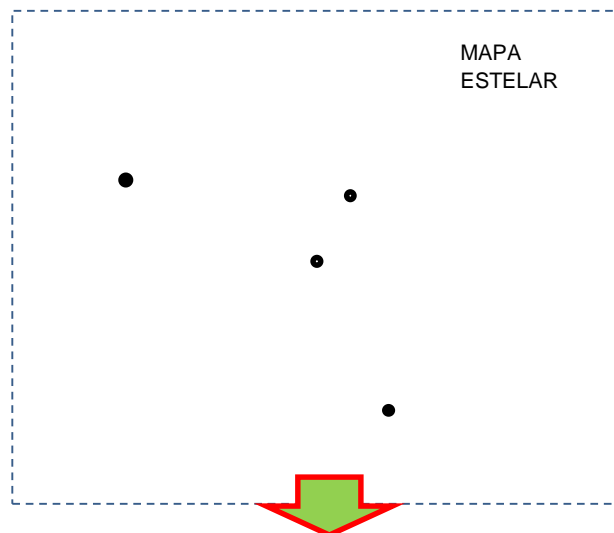
1º Faz-se a montagem ao lado, colocando um fio-de-prumo dentro de um tubo, encostado a uma parede exterior vertical.

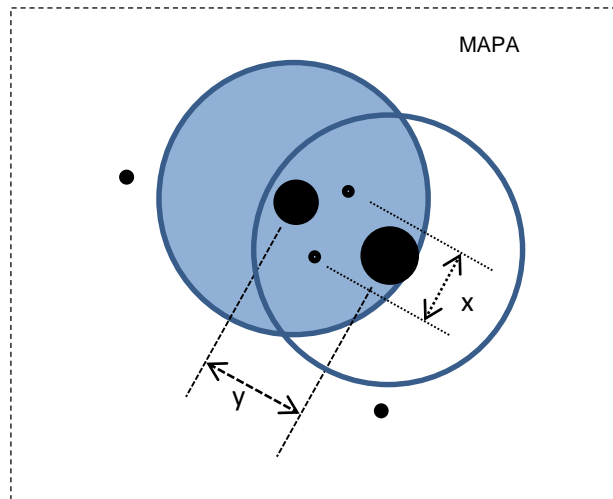
2º Tiram-se fotos do zênite em dois locais diferentes, A e B, no mesmo instante.

3º Sobre põem-se as duas imagens escolhendo duas estrelas

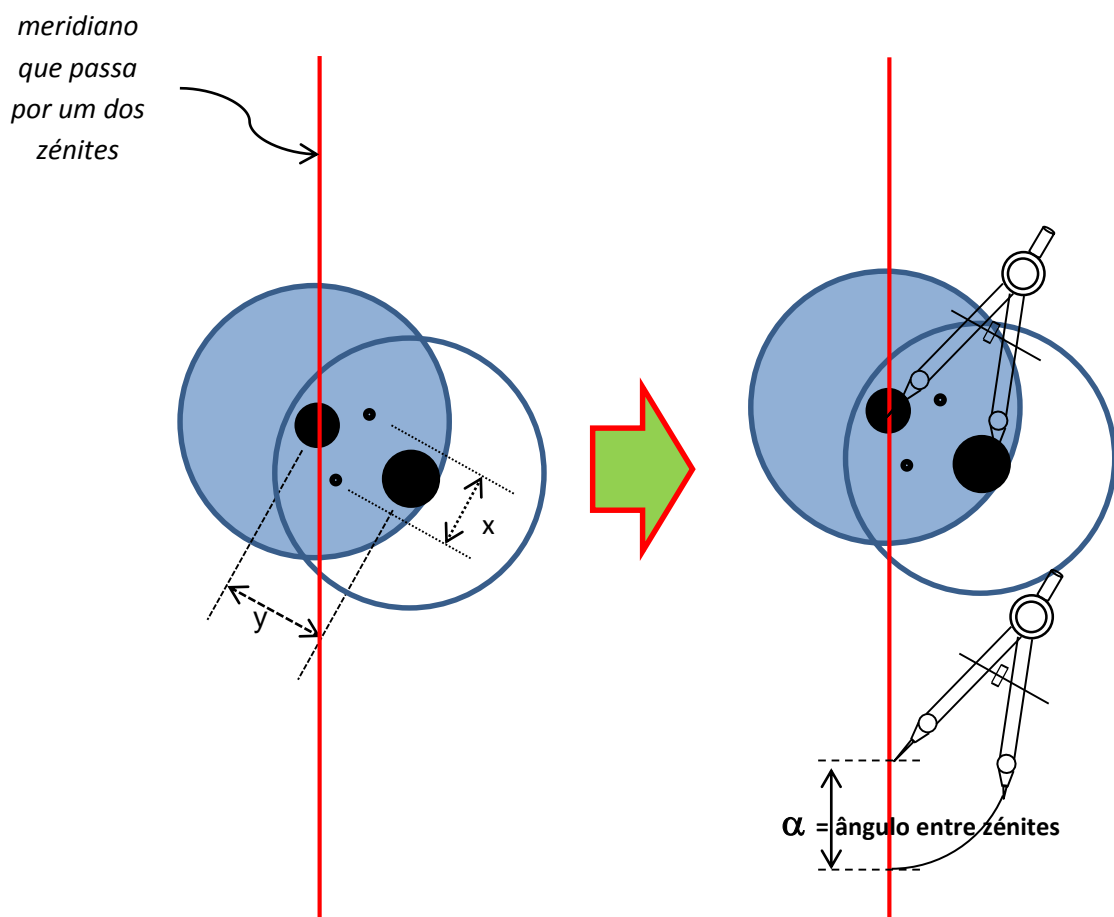


4º Num mapa estelar com a zona fotografada faz-se uma nova sobreposição





5º Mede-se a distância angular, entre os zênites por comparação com a escala de um meridiano no mapa



6º Com um carro mede-se a distância entre os dois locais. Suponhamos que deu z km. No entanto, se se souber a distância angular entre duas estrelas, por exemplo, β , pode-se calcular a distância angular entre os dois zênites, α , por uma proporção simples. $x/y = \beta/\alpha$

7º Com uma proporção consegue-se calcular facilmente a circunferência da Terra,

$$\frac{\alpha}{360^\circ} = \frac{z}{y}$$

O valor obtido é necessariamente maior que o real pois não é muito provável que se vá em linha reta do local A para o local B. E o que se mede é numa superfície plana e a superfície da Terra é curva. E a Terra não é totalmente esférica. Além disso a vertical não passa exatamente no centro da Terra, mas quase.

Em alternativa, pode-se, utilizar um mapa, com as duas localidades, A e B e achar a distância entre elas utilizando a escala desse mapa. Neste caso, o resultado fica ainda mais próximo do correto, pois eliminam-se as curvas do percurso mas falta a curvatura da Terra. Também se pode identificar os zénites e as estrelas mais próximas utilizando o programa *stellarium* o que pode ser vantajoso, pois este permite fazer *zooms* nas proporções que quisermos.

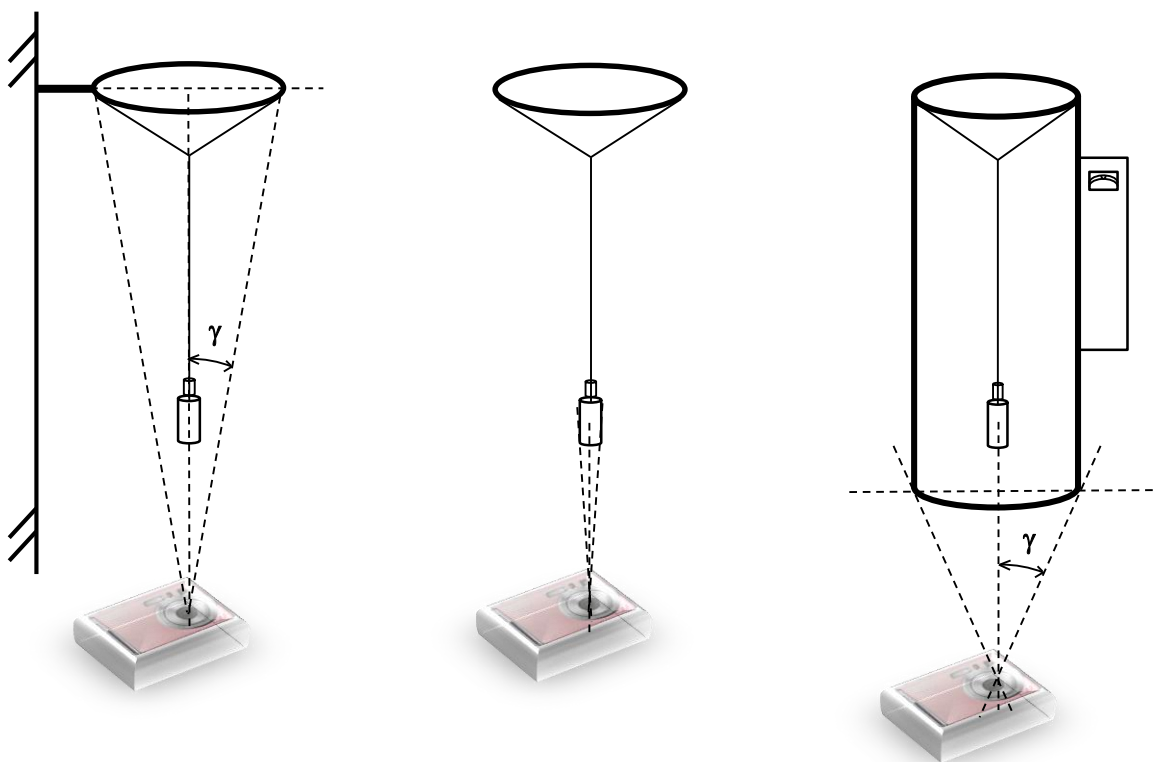
Ainda uma outra versão deste método pode ser praticada sem ser necessário usar um mapa. Para isso tiram-se duas fotos com a diferença de uma hora exata. Neste intervalo de tempo a esfera celeste rodou 15°. Sobrepondo as fotos consegue-se inferir a distância angular de 15° na longitude do(s) círculo(s) que contém o(s) zénite(s). Sabendo a(s) latitude(s) do(s) local(ais) pode-se saber a distância a que corresponde 1° na latitude, logo no meridiano. Então pode-se medir na sobreposição das fotos dos locais A e B o ângulo entre os dois zénites por proporcionalidade direta. A partir daqui procede-se como está indicado atrás a partir do ponto 6º (inclusive).

Como método alternativo, pode-se também determinar as coordenadas de dois locais, A e B, com um GPS e depois, utilizando fórmulas matemáticas, achar o ângulo entre as verticais de A e de B. Depois pode-se medir a distância num carro que nos transporte de A para B ou vice-versa. Com uma regra de proporcionalidade pode-se calcular o diâmetro da Terra. No entanto pode-se também neste caso considerar dois locais situados na mesma longitude pelo que a simples diferença entre coordenadas na latitude, obtida pela diferença das alturas da estrela polar medidas em cada local, dá-nos logo o ângulo entre os zénites. De seguida, de carro, pode-se medir a distância entre os dois locais e com uma proporção obtém-se a circunferência da Terra.

Como há o *Google Earth*, pode-se imprimir o percurso entre os dois pontos, e calcular a distância entre os dois locais em linha reta. De seguida procedendo como nos pontos 6º e 7º obtém-se a curvatura da Terra. Ora, o cálculo da distância entre dois pontos no *Google Earth* está indicado como facultativo nas metas de Geografia do 7º

ano, subdomínio, *A representação da superfície terrestre*, objetivo geral 4; compreender a diversidade de representações cartográficas; descritor 7: Utilizar as tecnologias de informação geográfica na representação da superfície terrestre: objetivo geral 5 - aplicar o conhecimento de escalas no cálculo de distâncias reais; descritor 3; calcular distâncias a partir de ferramentas informáticas (por exemplo, Google Earth) e/ou GPS.

Por outro lado também se pode saber o ângulo sem medir num mapa. Para isso temos de saber a distância da máquina fotográfica ao fio-de-prumo ou ao tubo onde está pendurado o fio-de-prumo ou o aro e o diâmetro desse fio-de-prumo com um pálmer ou do tubo ou do aro e calcular a tangente. Através desta pode-se determinar o ângulo, γ . E por proporção direta pode-se achar o ângulo α entre os zénites.



Numa outra alternativa, também se pode determinar a latitude e a longitude de dois lugares diferentes, sejam A e B, e marcar numa esfera celeste (convém que seja a maior possível). Com uma régua, em cima dessa esfera, medir a distância entre A e B. Depois, medir com a mesma régua o comprimento de um meridiano ou do equador. Com um carro, medir a distância entre os dois locais. Com uma proporção estabelece-se um valor máximo da circunferência da Terra. Deve-se entrar em linha de conta com a refração da atmosfera.

Pode-se até completar tudo isto com um estudo muito interessante dos erros cometidos nestes métodos.

6. CONCLUSÃO

Será algum dia possível ao Homem conseguir criar vida a partir da não vida? Não consigo dar uma resposta a esta questão que parece tão simples. Mas a definição de vida será sempre um assunto muito problemático. No entanto continuará igualmente a ser um assunto fascinante.

Há poucos anos pensava-se ser quase impossível haver vida do Universo além da Terra e mesmo aqui?!. Só mesmo com um milagre. Pensava-se que a vida era muito frágil e fora da Terra e também fora dos estreitos limites de temperatura e pressão existentes à sua superfície tudo morria cruelmente. Mas duas evoluções aconteceram recentemente: a descoberta de seres extremófilos e a descoberta de exoplanetas. Acresce ainda a possibilidade de haver um gigantesco número de planetas vagabundos e de anãs castanhas. Uma quase impossibilidade parece ter-se tornado numa quase certeza.

Assim, depois desta tese, fiquei convencido que deve haver vida de natureza extremófila em quase todo o sistema solar. De facto, há energia química em qualquer material que exista e a vida parece saber ir buscar essa energia praticamente a tudo com mais ou menos dificuldade. E por extensão todo o Universo deve estar cheio de vida. Mas para a ver é necessário na quase totalidade dos casos um microscópio.

Mas também é verdade que, a não ser na Terra, não há com toda a certeza vida complexa animal ou plantas no nosso sistema solar. E, em todo o Universo deve ser extremamente rara. No entanto a existir vida complexa, não deve haver dois locais do Universo onde ela seja exatamente igual. Que extraordinário seria encontrar dois seres humanos, ambos mamíferos mas de planetas de estrelas diferentes? A complexidade permite o desenvolvimento de muitíssimas formas diferentes. E a panspermia parece-me perfeitamente possível. A partir da altura em que é tão fácil um meteorito de um planeta próximo vir para aqui ou o contrário!...

Depois desta tese sinto-me com vontade de continuar a aprofundar todos os aspetos que consegui abordar. É um assunto inesgotável. Um só exemplo. Sabe-se que a água se consegue manter no estado líquido a temperaturas de mais de 300 °C. Para isso basta uma enorme pressão. Ora, não será possível existirem seres hiper-hiper-termófilos que consigam viver a estas temperaturas? Neste caso a pressão também poderia ajudar a manter a estabilidade da estrutura material das células.

Acho que o tema desta tese é mesmo um ótimo para se fazer uma ação de formação para professores. Não só dos grupos de Física e Química e Biologia-Geologia. Tem

implicações em todos os ramos do saber - filosóficas, psicológicas, religiosas e teológicas. Um dos exemplos deste último caso pode ser lido no livro, “O Princípio de todas as coisas - Ciência e religião” de Hans Küng. De facto, quase ninguém tem a consciência da existência de seres vivos que conseguem viver a mais de 100 °C, de energia nuclear, a 11 km de profundidade nos oceanos da Terra, etc...Uma lista infundável. Como também poucos conhecem que o Sol não é eterno. Há todo um mundo desconhecido que pode e deve ser dado a conhecer aos nossos alunos, futuros donos deste mundo. Isto também é civismo.

Mas uma coisa tenho quase a certeza. Nos próximos anos ver-se-á aumentar muito o número de exoplanetas conhecidos. E não tardará o dia em que a primeira vida extraterrestre no nosso sistema solar será dada a conhecer ao mundo.

Ainda recentemente li num jornal, *Astrobiology Magazine*, que cientistas detetaram evidências de ‘oceanos significativos’ de água no manto da Terra, numa camada interior com mais de 200 km de espessura (Williams, 2014, August 21), um pouco à semelhança do que se supõe que existe em Europa e que esta última, noutro jornal, *Space.com*, também tinha tectónica de placas (Wall, 2014, September 08). Ora, há sempre ótimas e empolgantes novidades a surgirem todos os dias e que são muito convidativas, muito estimulantes a que se prossigam as pesquisas a título individual e que se reflitam nas matérias que apresentamos aos nossos alunos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allègre, C., (1993), *As Fúrias da Terra*, traduzido por Sousa, F., Relógio d'água Editores, Lisboa

Almeida, A. C. de, Nolasco, C. C. e Nunes, A. N., 2014, *Metas Curriculares, 3º Ciclo do Ensino Básico (7º, 8º e 9º anos), Geografia*, Ministério da Educação e Ciência, disponível em: <http://dge.mec.pt/metascurriculares/index.php?s=directorio&pid=2>

Almeida, M. M, B. (coord.), Henriques, F., Vicente, J. N. e Barros, M. R., 2001, *Programa de Filosofia, 10º e 11º anos*, Ministério da Educação, disponível em: <http://dge.mec.pt/ensinosecundario/index.php?s=directorio&pid=2&letra=F>

Alves, E. I., (2010), *Pequeno Atlas do SISTEMA SOLAR*, Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra

Amador, F., Baptista, J. F. P., Mendes, A., Rebelo, D., Pinheiro, E., Silva, C. P. e Valente, R. A., 2001, *Programa de Biologia e Geologia, 10º ou 11º anos*, Ministério da Educação, disponível em:

<http://dge.mec.pt/ensinosecundario/index.php?s=directorio&pid=2&letra=B>

Amador, F., Baptista, J. F. P., Mendes, A., Rebelo, D., Pinheiro, E., Silva, C. P. e Valente, R. A., 2003, *Programa de Biologia e Geologia, 11º ou 12º anos*, Ministério da Educação, disponível em:

<http://dge.mec.pt/ensinosecundario/index.php?s=directorio&pid=2&letra=B>

Amador, F. e Silva, M., 2004, *Programa de Geologia, 12º ano*, Ministério da Educação, disponível em:

<http://dge.mec.pt/ensinosecundario/index.php?s=directorio&pid=2&letra=G>

Bauer, M., (2014, April 03), "Icy moon Enceladus has underground sea", ESA, disponível em:

<http://sci.esa.int/cassini-huygens/53938-icy-moon-enceladus-has-underground-sea>

Belbruno, E. & Gott III, J. R., (2005), Where Did the Moon Come From? *The Astronomical Journal* 129 1724. doi:10.1086/427539

Benton, M. J., (2008), *Breve história da Vida*, traduzido por Gonçalo Frota, 1ª edição (Junho de 2010), Texto Editores Lda, Alfragide, Portugal

Bonito, J. (coord.), Morgado, M., Silva, M., Figueira, D., Serrano, M., Mesquita, J. e Rebelo, H., (2013), *Metas Curriculares, Ensino Básico, Ciências Naturais, 5º, 6º, 7º e 8º anos*, Ministério da Educação e Ciência, disponível em:

<http://dge.mec.pt/metascurriculares/index.php?s=directorio&pid=22>

Bonito, J. (coord.), Morgado, M., Silva, M., Figueira, D., Serrano, M., Mesquita, J. e Rebelo, H., (2014), *Metas Curriculares, Ensino Básico, Ciências Naturais, 9º ano*, Ministério da Educação e Ciência, disponível em:

<http://dge.mec.pt/metascurriculares/index.php?s=directorio&pid=22>

Buescu, H. C., Maia, L. C., Silva, M. G. e Rocha, M. R., (2014), *Programa e Metas Curriculares de Português, Ensino Secundário*, Ministério da Educação e Cultura, disponível em:

<http://dge.mec.pt/metascurriculares/index.php?s=directorio&pid=60>

Buescu, H. C., Morais, J., Rocha, M. R. e Magalhães, V. F., 2012, *Metas Curriculares de Português, Ensino Básico*, Ministério da Educação e Cultura, disponível em:

<http://dge.mec.pt/metascurriculares/index.php?s=directorio&pid=16>

Brown, D., Dyches, P. & Mullins, S., (2014, July 28), "Cassini Spacecraft Reveals 101 Geysers and More on Icy Saturn Moon", NASA news releases, disponível em:

<http://www.jpl.nasa.gov/news.php?release=2014-246>

Byrd, G., Chernin, A., Letho, H., Letho, K., Teerikorpi, P., Valtonen, M., (2009), *The Evolving Universe and the origin of life*, Springer, New York

Clancy, P., Brack, A. & Horneck, G., (2005), *Looking for life, Searching the Solar System*, Cambridge University Press, Cambridge, UK

Clavin, W. & Harrington, J.D., (2014, April 25), NASA's Spitzer and WISE Telescopes Find Close, Cold Neighbor of Sun, NASA.

Collins, G. C., McKinnon, W. B., Moore, J. M., Nimmo, F., Pappalardo, R. T., Prockter, L. M. and Schenk, P. M., (2010). Tectonics of the outer planet satellites. In Thomas R. Watters & Richard A. Schultz (Ed), *Planetary Tectonics*. (pp. 264-350). Cambridge University Press, United Kingdom.

Coustenis, A., & Encrenaz, T., (2013), *Life Beyond Earth*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom

Crutzen P. J., e Brühl, C., (1996, February), Mass extinctions and supernova explosions, *Astronomy*, Vo. 93, pp. 1582-1584. Disponível em:
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC39984/pdf/pnas01508-0229.pdf>

Dartnell, L., (2007), *Life in the Universe*, Oneworld Publications, Oxford, England

DeLeon-Rodriguez, N., Lathem T. L., Rodriguez-R L. M., Barazesh J.M., Anderson B. E., Beyersdorf A. J., Ziemba L. D., Bergin M., Nenes A., and Konstantinidis K. T., (2013), Microbiome of the upper troposphere: Species composition and prevalence, effects of tropical storms, and atmospheric implications, *Biological Sciences - Environmental Sciences, PNAS, Vol. 110 No. 7, (Feb. 12, 2013), 2575-2580.* doi: 10.1073/pnas.1212089110

Disk, *The Astronomical Journal*, 142-152 (11pp), November. doi:10.1088/0004-6256/142/5/152

Ellis, J., Schramm, D. N., (1995, January), Could a nearby supernova explosion have caused a mass extinction ?, *Astronomy*, Vo. 92, p. 235-238, disponível em:
www.pnas.org/content/92/1/235.full.pdf

Encrenaz, T., Bibring, J., Blanc, M., Barucci, M., Roques, F., Zarka, P., (2003), *Le système solaire*, Nouvelles Ed, EDP Sciences et CNRS Éditions, Paris

Eubanks, T. M., (2013, October 12), *Dark Earths: Initial Goals for Interstellar Exploration*, Asteroid Initiatives LLC, Clifton, Virginia

Eubanks T. M., (2014, November13), *Nomadic Planets Near the Solar System* – viXra.org, disponível em: vixra.org/pdf/1411.0131v1.pdf

Exoplanet.eu, (2009, August 14), Planet WASP-17, The Extrasolar Planet Encyclopedia.

Faure, G., and Mensing, T. M., (2005), *Introduction to Planetary Science*, Springer, New York

Fernández, J. A., (2005), *COMETS, Nature, Dynamics, Origin, and their Cosmological Relevance*, Astrophysics and Space Science Library, Vol. 328, Editorial Board, Springer, Netherlands

Festas, I., e Damião, H. (coordenação pedagógica), Bivar, A., Grosso, C., Oliveira, F. e Timóteo, M. C., (coordenação científica), 2014, *Metas Curriculares de Matemática - Ensino Básico*, disponível em:

<http://dge.mec.pt/metascurriculares/index.php?s=directorio&pid=17>

Festas, I., e Damião, H. (coordenação pedagógica), Bivar, A., Grosso, C., Oliveira, F., Timóteo, M. C. e Loura, L., (coordenação científica), 2014, *Programa e Metas Curriculares, Matemática A, Ensino Secundário*, Ministério da Educação e Ciência, disponível em: <http://dge.mec.pt/metascurriculares/index.php?s=directorio&pid=60>

Fiolhais, C. (coord.), Ferreira, A. J., Constantino, B., Portela, C., Braguez, F., Ventura, G., Nogueira, R. e Rodrigues, S., (2013), *Metas Curriculares do 3º Ciclo do Ensino Básico, Ciências Físico-Químicas*, Ministério da Educação e Ciência, disponível em: <http://dge.mec.pt/metascurriculares/index.php?s=directorio&pid=23>

Fiolhais, C. (coordenação científica), Festas, I., e Damião, H. (coordenação pedagógica), Fiolhais, C. (coord.), Portela, C., Ventura, G., e Nogueira, R., (2014), *Metas Curriculares de Física, 12º ano*, Ministério da Educação e Ciência, disponível em: <http://dge.mec.pt/metascurriculares/index.php?s=directorio&pid=60>

Fiolhais, C. (coordenação científica), Festas, I., e Damião, H. (coordenação pedagógica), Fiolhais, C. (coord. Física), Portela, C., Ventura, G., e Nogueira, R., Rodrigues, S. (coord. Química), Ferreira, A. J., Braguez, F. e Matos, M. G., (2014), *Programa de Física e Química A, 10º e 11º anos*, Ministério da Educação e Ciência, disponível em: <http://dge.mec.pt/metascurriculares/index.php?s=directorio&pid=60>

Galileo NIMS team, (1998), Salts on Europa's Surface From The Galileo NIMS Investigation, *Lunar and Planetary Science XXIX*, disponível em: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/LPSC98/pdf/1560.pdf>

Gifford, S. E., (2014, April 03), “*Out-of-this-world: an ocean on Enceladus*”, disponível em: <http://www.astrobio.net/news-exclusive/out%c2%ad-of%c2%ad-this%c2%ad-world-an-ocean-on-enceladus/>

Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K. & Morbidelli, A., (2005, May 26), Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets, Letters, *Nature*, Vo. 435, p. 466-469. doi:10.1038/nature03676.

Greenberg, R., (2008), *Unmasking Europa*, Copernicus Books in association with Praxis Publishing Ltd, New York

Grotzinger, J., Jordan, T., Press, F., Siever, R., (2007), *Understanding Earth*, 5ª edição, W. H. Freeman and Company, New York

Grousson, M. & Fontez, M., (2014, Decembre), Vie extraterrestre – L'espoir, il existerait une autre terre dans le système solaire, *Science et Vie*, No 1167, p. 54-65.

Jones, B. W., (2004), *Life in the Solar System and Beyond*, Springer in association with Praxis Publishing, Chichester

Joshi, M. M., Haberle, R. M., Reynolds, R. T., (1997), *Simulations of the atmospheres of Synchronously Rotating Terrestrial Planets Orbiting M Dwarfs: Conditions for atmospheric Collapse and the implications for Habitability*, *Ícarus*, Vol.129, pp. 450 - 465

Kattenhorn, S. A. & Prockter, L. M., (2014), *Subduction On Europa: A Nutrient Conveyor Belt Into The Ice Shell?*, Workshop on the Habitability of Icy Worlds, disponível em: <http://www.hou.usra.edu/meetings/icyworlds2014/pdf/4004.pdf>

Kraus, I., (18 th january 2012). *Habitable zone*, 0907528, disponível em: https://www.univie.ac.at/.../5/5c/Habitable_Zone.pdf

Küng, H., (2005), *O Princípio de todas as coisas*, traduzido por Jorge Telles de Menezes, 1ª edição (Junho de 2011), Edições 70 Lda, Lisboa, Portugal

Lammer, H. et al, (2009), What makes a planet habitable? *Astronomy & Astrophysics Review* 17:181–249. doi: 10.1007/s00159-009-0019-z

Lammer, H., (2009), *Habitability - FFG*, Austrian Academy of Sciences, Space Research Institute, disponível em: <https://www.ffg.at/getdownload.php?id=3919>

Lecture14: The Habitable Zone, disponível em: www.astro.umd.edu/~miller/teaching/.../lecture14.pdf

Lecture 10: Habitable Zones – iSites, disponível em: isites.harvard.edu/.../10%20Habitable%20Zones.pdf

Lemonick, M. D., (2014, July), Estamos sós – A vida fora da Terra, *National Geographic Portugal*, No 160, p. 2-21.

Levison, H. F., Morbidelli, A., Tsiganis, K., Nesvorný, D. & Gomes, R., (2011), Late Orbital Instabilities in The Outer Planets Induced by Interaction With a Self-Gravitating

Lineweaver, C. H., (2001), "An Estimate of the Age Distribution of Terrestrial Planets in the Universe: Quantifying Metallicity as a Selection Effect", *Ícarus*, Vol. 151, p. 307-313 doi:10.1006/icar.2001.6607 disponível online at <http://www.idealibrary.com>

Loon, G. W. van., and Duffy, S. J., (2005), *Environmental Chemistry - a global perspective*, 2ndEd., Oxford University Press Inc., New York

Lorentz, R., and Mitton, J., (2008), *The Evolving Universe and the origin of life*, Princeton University Press, New Jersey

Lorentz, R., and Mitton, J., (2008), *Titan Unveiled*, Princeton University Press, New Jersey

Martinez, C., Hupp, E. & Brown, D., (2006, September 03), NASA's Cassini Discovers Potential Liquid Water on Enceladus, disponível em:
http://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/media/cassini-20060309.html

McCord, T.B., Hansen, G., Fanale, F.P., Carlson, R.W., Matson, D., Johnson, T. V., Smythe, W., Crowley, J. K., Martin, P.D., Ocampo, A., Hibbitts, C.A., Granahan, J.C. &

Mckay, C. & Matson, D., (2008, March 26), NASA - A Perspective on Life on Enceladus: A World of Possibilities, disponível em:
www.nasa.gov/mission_pages/cassini/media/enceladus-f20080326.html

McNab, D. and Younger, J., (1999), *Os Planetas*, traduzida por Dias, A., 1^a Ed., Edições Atena Lda, Estoril

Mendes, C., Silveira, C. e Brum, M., 2001, *Programa de História A, 10º, 11º e 12º anos*, Ministério da Educação, disponível em:
<http://dge.mec.pt/ensinosecundario/index.php?s=directorio&pid=2&letra=H>

Mendes, C., Silveira, C., Vieira, B. D. e Brum, M., 2001, *Programa de História B, 10º ano*, Ministério da Educação, disponível em:
<http://dge.mec.pt/ensinosecundario/index.php?s=directorio&pid=2&letra=H>

Mendes, C., Silveira, C., Vieira, B. D. e Brum, M., 2001, *Programa de História B, 11º ano*, Ministério da Educação, disponível em:
<http://dge.mec.pt/ensinosecundario/index.php?s=directorio&pid=2&letra=H>

Mojzsis S. J., Harrison T. M. & Pidgeon R. T., (2001), Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4,300 Myr ago, *Nature*, 409, 11 jan, 178-181. Disponível em:

http://isotope.colorado.edu/~mojzsis/2001_Mojzsis_Nature.pdf

Moutinho, S., (2013, Janeiro 30), Micróbios em alta, *Ciência Hoje On-line*. Consultado em <http://cienciahoje.uol.com.br/noticias/2013/01/microbios-em-alta>

Nasa, JPL-CIT, (2013, December 11) *Clay-Like Minerals Found on Icy Crust of Europa*, disponível em: <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2013-362>

NASA, (2009, October 08), NASA - Planetary Smash-Up

Pinna, L., (1998), *A CONQUISTA DO ESPAÇO* traduzido por Regina Valente, supervisão científica de Eurico da Fonseca, Enciclopédia Pedagógica Universal, Volume 6, QuidNovi

Porco, C. (2008, December), The Restless Encel, *Planetary Science, Scientific American*, p. 52-63, disponível em:

<http://carolynporco.com/in-the-news/popular-writings/scientific-american-restless-enceladus-carolyn-porco.pdf>

Redd, N. T., (2013, Feb 4), Habitable Binary Star Systems, *Astrobiological Magazine*, disponível em:

<http://www.astrobio.net/news-exclusive/habitable-binary-star-systems/#sthash.ZfU9kY3c.dpuf>

Ribeiro, A. I., Nunes, J. P. A. e Cunha, P. J. P., 2013, *Metas Curriculares de História, 3º Ciclo do Ensino Básico*, Ministério de Educação e Cultura, disponível em:

<http://dge.mec.pt/metascurriculares/index.php?s=directorio&pid=19>

Rosnay, J., (1984), *As Origens da Vida - do átomo á célula*, traduzido por Faria, A. L., Livraria Almedina, Coimbra

Sá, N., (2005), *Astronomia geral*, Escolar Editora, Lisboa

Schirber, M., (2009, September 24), "Comets may give life a hand", disponível em:

<http://www.astrobio.net/news-exclusive/comets-may-give-life-a-hand/>

Sotin, C., Grasset, O., Tobie, G., (2009), *Planétologie - Geologie des planets et des satellites*, Sciences Sup, Dunod, Paris

SPACE.com. Staff, (2012, February 24), "Nomad Alien Planets May Fill Our Milky Way Galaxy", disponível em:

www.space.com/14667-nomad-alien-planets-wandering-galaxy.html

SPACE.com Staff, (2013, January 07), 'Exocomets' Common Across Milky Way Galaxy, disponível em:

<http://www.space.com/19156-exocomets-alien-solar-systems.html>

Tate, K., (2013, June 25), Potentially Habitable Planets of Star Gliese 667C Explained (Infographic), *SPACE.com*.

Telford, G. and Morris, B., (2011), *A Pretty Nice Model*, disponível em:

www.astro.washington.edu/courses/astro557/Nice.pdf

Uyeda, S., (1978), *Uma nova concepção da Terra*, traduzido por Fernando Magalhães, revisão científica de Galopim de Carvalho, 1ª edição (Abril de 1992), Ciência Aberta, Gradiva, Lisboa

Wall, M., (2014, September 08). Jupiter's Moon Europa May Have Plate Tectonics Just Like Earth. *Space.com*. Disponível em

<http://www.space.com/27059-jupiter-moon-europa-plate-tectonics.html>

Wall, M., (2011, May 17) Is the Rocky Alien Planet Gliese 581d Really Habitable?, *Space.com*.

Ward, P. D. & Brownlee, D., (2003), *Rare Earth - Why complex life is Uncommon in the Universe*, Paperback Ed., Copernicus Books, New York

Wickramasinghe, C., Wickramasinghe, J. and Napier, W., (2010), *Comets and the origin of life*, Cardiff University, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., London

Wilde S. A., Valley J. W., Peck, W. H. & Graham C.M., (2001), Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago, *Nature*, 409, 11 jan, 175-178. Disponível em:

www.geology.wisc.edu/.../zircons/Wilde2001Nature.pdf

Williams A., (2014, August 21). Scientists Detect Evidence of 'Oceans Worth' of Water in Earth's Mantle. *Astrobiology Magazine*. Disponível em:

<http://www.astrobio.net/news-exclusive/scientists-detect-evidence-oceans-worth-water-earths-mantle/#sthash.rZtNL5QM.dpuf>

Witze, A., (2014, April 03), Icy Enceladus hides a watery ocean, *Nature News*, disponível em:

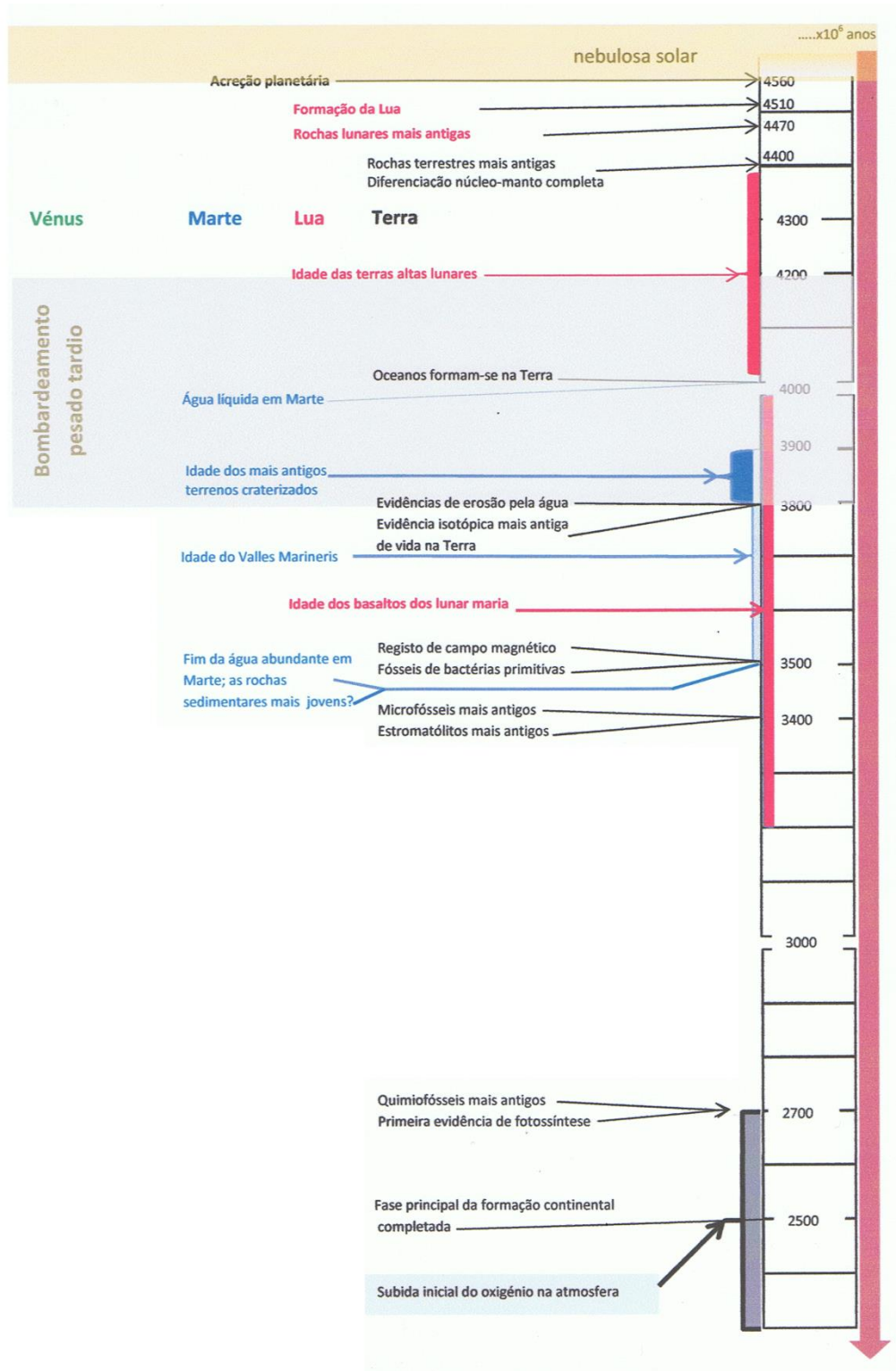
<http://www.nature.com/news/icy-enceladus-hides-a-watery-ocean-1.14985>

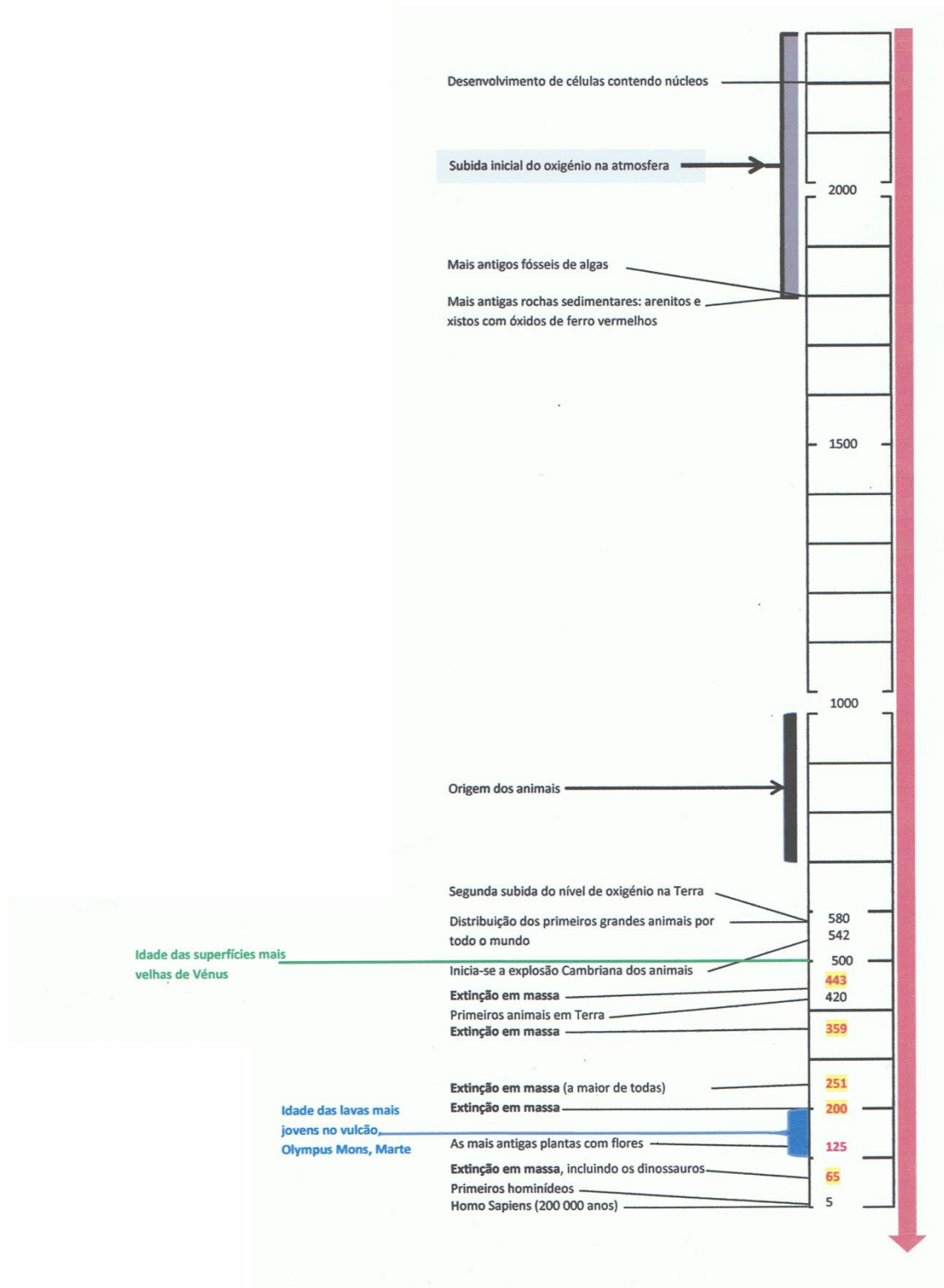
Witze, A., (2014, September 11), Plate tectonics found on Europa, *Nature*, Vol. 513, 153-154 disponível em:

http://www.nature.com/polopoly_fs/1.15851!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/513153a.pdf

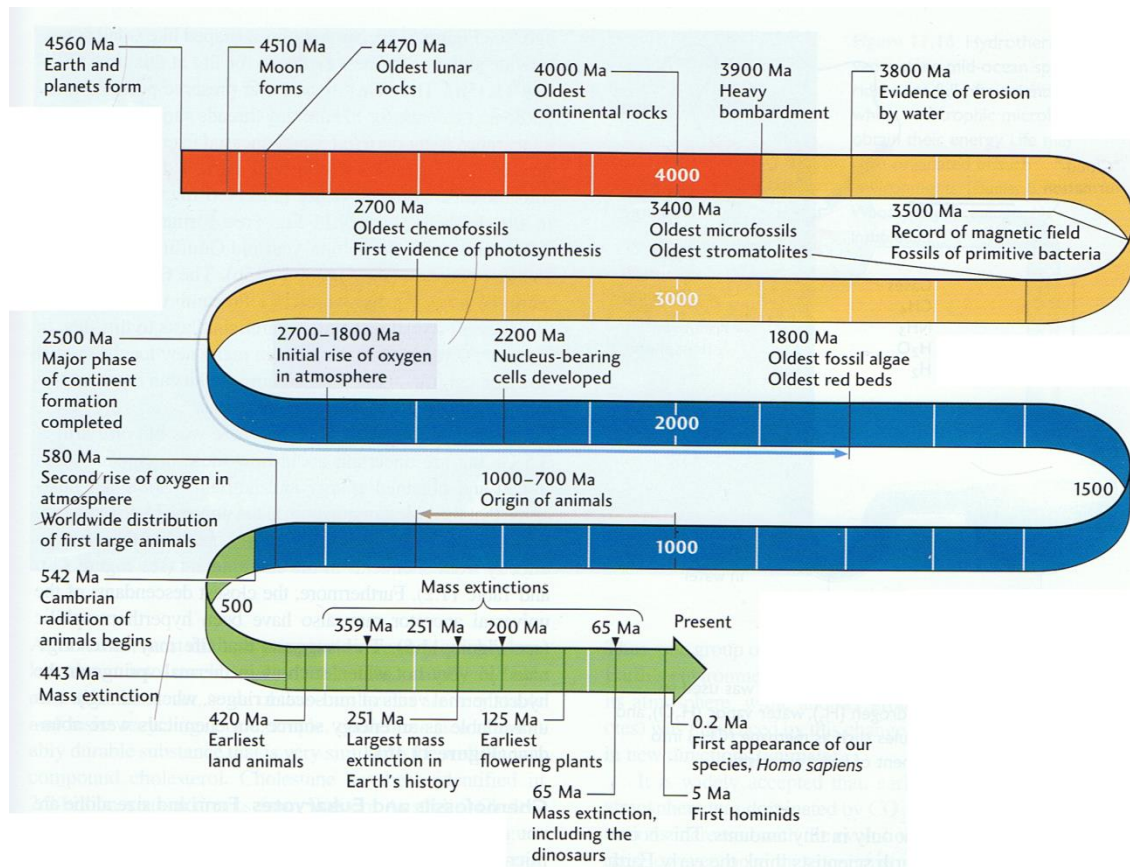
Yun, J. L., (2011), *Vida no Universo - o caminho para a descoberta de organismos extraterrestres*, Aventura da Ciência, Vol. 6, Editorial Presença, Lisboa

ANEXO 1: HISTÓRIA DOS PLANETAS TERRESTRES E LUA



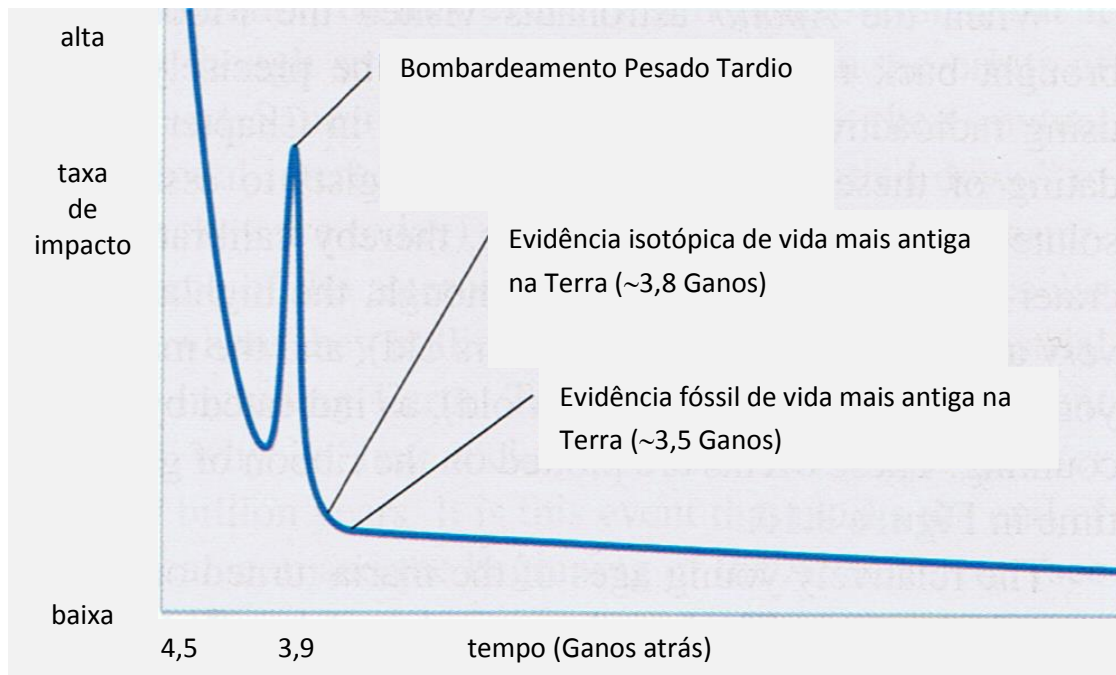


ANEXO 2: Os maiores acontecimentos geobiológicos na história da Terra



ANEXO 3:

O número de impactos varia com o tempo. Os planetas foram formados por uma cadeia de colisões que depois foram diminuindo nos primeiros 500 milhões de anos da sua evolução. Contudo, houve depois uma fase tardia, conhecida por bombardeamento pesado tardio, que atingiu o auge à volta de 3,9 Ganos.



ANEXO 4: Um planeta vagabundo, Wise 0855-0714 e um sistema binário com uma anã castanha, Wise 1049-5319, estão entre os “quatro objetos” mais próximos do Sol.

OS VIZINHOS MAIS PRÓXIMOS DO SOL

